基于未确知测度理论-有限元法的边坡安全评价*

郭浩森[1]，项正贵[2]，齐炎[3]，宋磊博[4]，王刚[4]

(1.华东交通大学 土木建筑学院， 江西 南昌 330013；
2.广东深莞惠城际铁路运营有限公司， 广东 深圳市 518049；
3.中国瑞林工程技术股份有限公司， 江西 南昌 330031；
4.绍兴大学， 浙江 绍兴市 312000)

摘要：为保证露天矿山的安全运营，有必要对其所属边坡进行安全评价。以某矿山边坡为研究对象，采用有限元法建立边坡数值计算模型，分析边坡应力、位移和塑性区分布规律，并采用多种定量分析法计算边坡安全系数。结果表明，边坡最大位移、塑性区以及最小安全系数均靠近第三级边坡。以第三级边坡为评价对象，采用未确知测度理论构建单指标测度函数，借助熵权法确定指标权重，并采用距离判别法作为边坡安全等级的评价准则。研究结果表明，某露天矿山边坡评价等级为Ⅱ级，评价结果与数值模拟结果一致，证实了该矿山边坡处于较稳定的安全状态。对边坡风险区域进行加固监测后，露天矿山运营期间并未发生边坡事故，验证了未确知测度理论-有限元法对边坡安全评价的可靠性和实用性。

关键词：边坡稳定性；未确知测度理论；安全系数；有限元法

中图分类号：TD854.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)07-0116-08

Slope Safety Evaluation Based on Unascertained Measurement Theory-Finite Element Method

Guo Haosen[1], *Xiang Zhenggui*[2], *Qi Yan*[3], *Song Leibo*[4], *Wang Gang*[4]

(1.School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China;
2.Guangdong Shenzhen-Dongguan-Huizhou Intercity Railway Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518049, China;
3.China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330031, China;
4.Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

Abstract: To ensure the safe operation of open-pit mines, safety evaluation of their slopes needs to be carried out. A slope of a certain mine was taken as the research object. A numerical calculation model of the slope was established by the finite element method, the distribution laws of slope stress, displacement and plastic zone were analyzed, and the slope safety factor was calculated by multiple quantitative analysis methods. The results show that the maximum slope displacement, plastic zone and minimum safety factor are all close to the third-stage slope. The third-stage slope was taken as the evaluation object. Single index measurement functions were constructed by the unascertained measurement theory, index weights were determined by the entropy weight method, and the distance discriminant method was adopted as the evaluation criterion for slope safety grade. The research results show that the evaluation grade of the slope in an open-pit mine is Grade Ⅱ. The evaluation results are consistent with the numerical simulation results, which verifies that the mine slope is in a relatively stable safety state. After reinforcement and monitoring were carried out on the slope risk areas, no slope accidents occurred during the operation of the open-pit mine, which verifies the reliability and practicability of the unascertained measurement theory-finite element method for slope safety evaluation.

Key words: Slope stability, Unascertained measurement theory, Safety factor, Finite element method

---

* **收稿日期**：2025-04-09

基金项目：江西省自然科学基金项目(20232BAB204092)；江西省防灾减灾及应急管理重点实验室项目(20212BCD42011)；江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2200674)；赣鄱俊才支持计划——主要学科学术和技术带头人培养项目(20243BCE51187)

作者简介：郭浩森(1987—)，男，河南焦作人，博士，副教授，主要研究方向为矿业工程、岩土工程、岩体质量评价、围岩损伤检测、隧道稳定性分析。E-mail:1750849924@qq.com

0　引言

矿产资源的开采在带来了经济迅速腾飞的同时，也引发了诸多问题[1]。其中，边坡稳定性是露天矿山安全治理的重点，边坡一旦失稳，将造成巨大的生命财产损失，如 2023 年阿拉善新井煤矿滑坡事故[2]。因此，开展边坡稳定性分析及安全评价尤为重要。

针对边坡稳定分析及安全评价，国内外学者从数值模拟、理论分析、现场监测等角度进行了较为深入的研究，刘亮等[3]、许文浒等[4]、刘惠洋等[5]基于有限元理论建立边坡数值模型，从安全系数、位移变化、应力分布、塑性区分布等多个角度分析边坡稳定性，为边坡安全分析与设计提供指导；刘柳等[6]、赵明华等[7]、尹永明等[8]采用了极限平衡法、强度折减法、毕肖普法等方法对边坡稳定性进行了分析，为边坡安全分析提供了理论指导依据；Chen 等[9]提出了一种考虑随机场的土边坡裂缝层水力学耦合分析模型，研究了气象条件下干燥裂纹对边坡稳定性的影响；荣光旭等[10]建立了一种基于改进布谷鸟(ICS)算法和 Elman 神经网络的边坡稳定预测模型，结果表明，该模型具有较好的预测精度；杨飞等[11]、陈涛等[12]研究表明，MSR 边坡雷达、地基合成孔径雷达技术能够有效地完成露天矿边坡变形监测，实现对边坡变形的及时预警，为矿山安全生产与边坡稳定性分析提供支撑。此外，系统综合评价方法在边坡领域进一步应用，如未确知测度理论[13-14]、模糊数学理论[15]、灰色关联法(GRA)-层次分析法(AHP)[16-17]等被广泛应用于边坡稳定性评价，但这些方法仍存在一定不足，例如层次分析法、模糊数学理论评价结果均易受主观性影响。

综上，仅采用单一分析方法进行边坡稳定性分析难免存在一些局限性，且所得结果的正确性也缺乏其他方法的验证。因此，亟须寻求多角度系统综合评价方法，综合考虑影响边坡稳定性的关键因素，对边坡稳定性进行全面评价。

本文以某矿山边坡为研究对象，首先，采用有限元方法建立边坡数值计算模型，从应力、位移、塑性区等方面分析边坡稳定性；其次，从理论角度出发，分别采用多种定量分析法计算边坡安全系数，探究了不同理论分析方法下边坡安全系数的变化规律，并借助应用较为成熟的未确知测度理论，选取影响边坡稳定性的主要因素，建立未确知测度单指标函数，采用熵权法确定各指标权重并构造多指标测度函数；最后，利用距离判别法对边坡安全性进行评价。该评价方法具有简单、高效和准确率高等特点，被广泛应用于边坡安全设计，在实际应用中具有重要意义，可为类似工程提供一定参考。

1　工程概况

根据某矿山边坡的工程地质条件和水文地质条件，该边坡主要赋存于粉质黏土、强风化泥岩、中风化泥岩和强风化粉砂岩等地层中。本文主要研究自然状态下边坡的稳定性，采用有限元方法建立边坡数值计算模型，如图 1 所示(颜色标识见电子版)。模型中，从上至下第一级、第二级边坡为粉质黏土层(用紫色网格表示)，第三级边坡为强风化泥岩层(用深绿色网格表示)，第四级边坡为中风化泥岩层(用浅蓝色网格表示)，第五级边坡为强风化粉砂岩(用深黄色网格表示)。

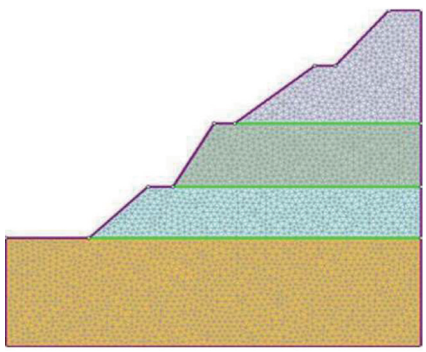


图 1　数值计算模型

Fig.1　Numerical calculation model

2　模型建立与系统评价方法

2.1　基本假设与边界条件

本文研究作如下假设：

(1) 土层材料均为各向同性材料；

(2) 土体主要受到自身的自重应力影响，忽略构造应力的影响；

(3) 土层材料的物理力学性质在空间上均匀分布，不随位置变化。

在边界条件设置上，边坡靠近地表的一面为自由面，不施加任何约束；模型底部施加固定约束；模型左右两个平面施加水平方向的约束。

2.2　岩土体物理力学参数

根据该矿山边坡的实际情况，通过现场取样、室内试验、地勘报告并结合数值模拟经验，各土层材料

强度准则均采用 Mohr-Coulomb 本构模型,确定各土层材料的材料力学参数,见表 1。

表 1 边坡土层力学参数

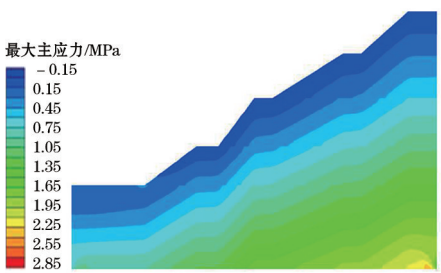
Table 1 Slope soil mechanical parameters

边坡	土层属性	弹性模量 E/MPa	容重 γ/(kN/m^3)	黏聚力 c/(kN/m^2)	内摩擦角 φ/(°)	渗透系数 K/(m/d)	泊松比 ν
一、二级	粉质黏土	75	18.9	38	24	4.44×10^{-8}	0.31
三级	强风化泥岩	32	22.5	115	20	1.19×10^{-8}	0.34
四级	中风化泥岩	44	26.5	210	32	5.30×10^{-9}	0.28
五级	强风化粉砂岩	56	27.1	250	30	6.20×10^{-9}	0.26

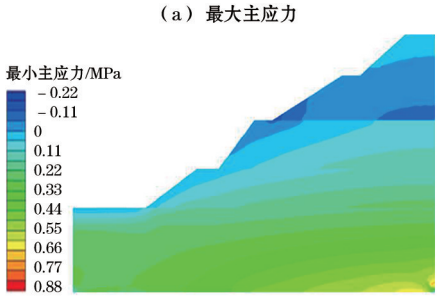
3 数值模拟结果分析

3.1 应力分析

图 2 为某露天矿山边坡应力分布云图,其中图 2(a)为最大主应力分布云图,图 2(b)为最小主应力分布云图。可以看出,边坡的最大主应力和最小主应力自地表至底部岩层呈现出层状分布的规律,边坡的最大主应力为 2.85 MPa,其中边坡为受拉,最大拉应力为 0.15 MPa;边坡最小主应力为 0.88 MPa,所受拉应力为 0.22 MPa。边坡主要处于受拉状态,且越靠近地表边坡所受的拉应力越大,特别是靠近上部的第二级边坡,所受拉应力最大。



(a) 最大主应力



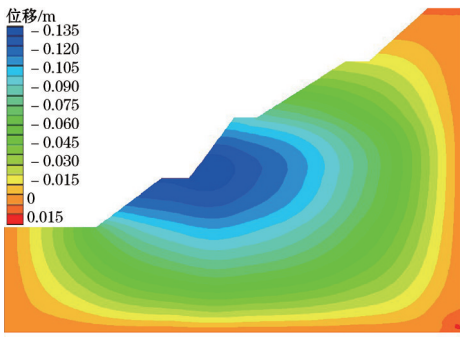
(b) 最小主应力

图 2 边坡应力分布云图

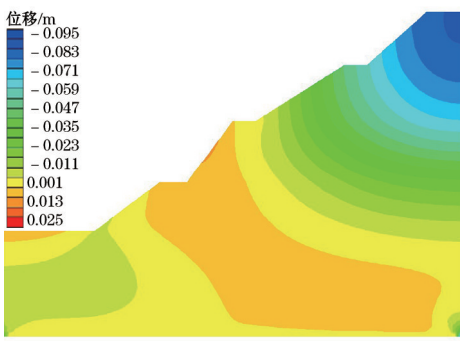
Fig.2 Stress distribution cloud maps of slope

3.2 位移分析

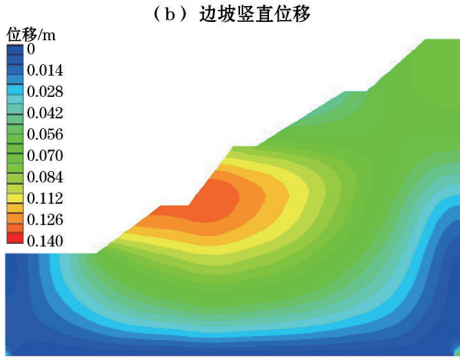
图 3 为边坡位移分布云图,其中图 3(a)为水平位移云图,图 3(b)为竖直位移云图,图 3(c)为总位移云图。可以看出,边坡的最大水平位移为 0.135 m,最大竖直位移为 0.095 m,最大总位移为 0.140 m,且最大位移主要发生在边坡地表处;其中,最大水平位移发生在边坡底部,最大竖直位移发生在边坡顶部,最大总位移发生在边坡底部。



(a) 边坡水平位移



(b) 边坡竖直位移



(c) 边坡总位移

图 3 边坡位移分布云图

Fig.3 Displacement distribution cloud maps of slope

3.3 塑性区分析

图 4 为自然状态边坡的塑性区分布云图(颜色

标识见电子版)。当土层所受应力达到极限抗拉强度时,土体即进入塑性状态,称之为塑性区。可以看出,靠近底部的土层主要为天然应力状态,呈现出受压状态(蓝色区域);靠近上部的第二级边坡主要呈现为抗拉状态(红色区域)。

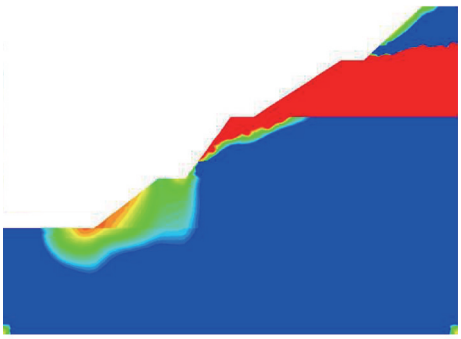


图 4 边坡塑性区分布云图

Fig.4 Plastic zone distribution cloud map of slope

3.4 安全系数分析

边坡的最小安全系数在靠近地表的第三级边坡处,采用普通条分法、毕肖普法、简布法和极限平衡法分别计算安全系数,结果见表 2。根据该露天矿山边坡的实际情况,该边坡为永久边坡,依据边坡设计规范[18],自然状态下边坡的安全系数取 1.25。对比可知,4 种理论方法计算得到的边坡安全系数均大于设计规范中的 1.25,表明该边坡的安全性较好。尽管自然状态下边坡的安全性较好,但仍应加强对边坡的监测,特别是局部稳定性相对较弱的部位,可采用锚杆、喷射混凝土和土钉等措施对其进行加固支护。

表 2 安全系数计算结果

Table 2 Calculation results of safety factor

计算方法	安全系数
普通条分法	1.299
毕肖普法	1.349
简布法	1.267
极限平衡法	1.345

4 边坡稳定性评价及分析

4.1 未确知测度理论

4.1.1 单指标测度

本研究采用未确知测度理论法[19]对某露天矿山边坡进行安全评价。假设评价对象有 m 个评价因素,则令评价对象 $X=\{X_1,X_2,X_3,\cdots,X_m\}$;假设评价因素有 n 个评价指标,则令评价因素 $F=\{F_1,F_2,F_3,\cdots,F_n\}$,则 X_{ij} 表示评价因素X_i 关于评价指标F_j 的测量值;设 X_{ij} 有 p 个风险等级,记评价空间 $U=\{C_1,C_2,\cdots,C_p\}$,其中 C_k 为第 k 级风险等级,且满足$C_k>C_{k+1}$(第 k 级比第 $k+1$ 级安全程度高);若评价等级满足条件 $C_1>C_2>\cdots>C_p$,则可称其为评价空间 U 的一个有序割集。令 $u_{ijk}=u(X_{ij}\in C_k)$,表示 X_{ij} 隶属于第 k 个风险等级 C_k 的程度,当 u 同时满足以下条件时,称之为未确知测度:

(1) $0\leqslant u(X_{ij}\in C_k)\leqslant 1$;

(2) $u(X_{ij}\in U_{k=1}^{p}C_k)=\sum_{k=1}^{p}u(X_{ij}\in C_k)$。

则各指标测度值 u_{ijk} 构成的单指标测度评价矩阵为:

$$(u_{ijk})_{m\times p}=\begin{bmatrix} u_{i11} & u_{i12} & \cdots & u_{i1p} \\ u_{i21} & u_{i22} & \cdots & u_{i2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{im1} & u_{im2} & \cdots & u_{imp} \end{bmatrix} \tag{1}$$

4.1.2 指标权重确定

研究采用熵权法确定指标权重。根据熵权法的定义,对于既定指标,其权重的离散程度可通过熵值来衡量。熵值越小,说明指标的离散程度越大,即该指标对于边坡稳定性的影响越大;反之,熵值越大,离散程度越小,指标对边坡稳定性的影响越小。该方法的优点在于不受人为因素的干扰,结果较为准确。熵权法的具体步骤如下。

(1) 归一化指标值。

在计算过程中,由于所选取的各项指标单位不同,在计算前要对各指标的单位进行标准化处理,以便于后续计算。设 Y_{ij} 为标准化处理后的指标值,则 $Y_{ij}\in(0,1)$,计算公式如下:

$$Y_{ij}=\frac{x_{ij}-\min x_{ij}}{\max x_{ij}-\min x_{ij}} \tag{2}$$

其中,$i=1,2,3,\cdots,m$; $j=1,2,3,\cdots,n$。

(2) 计算指标的比重P_{ij}:

$$P_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}Y_{ij}} \tag{3}$$

(3) 计算第 j 项指标的熵值 E_j:

$$E_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{m}P_{ij}\ln P_{ij} \tag{4}$$

其中,若$P_{ij}=0$,则定义 $\lim\limits_{P_{ij}\to 0}P_{ij}\ln P_{ij}=0$。

(4) 计算各指标的权重值 W_j:

$$W_j=\frac{1-E_j}{j-\sum_{j=1}^{n}E_j}(j=1,2,3,\cdots,n) \tag{5}$$

4.1.3 构造多指标未确知测度

根据单指标测度函数的定义,采用直线型测度函数构建某露天矿山边坡稳定性评价指标的各指标测度函数,如下式所示。

$$\begin{cases} u_i(x)=\begin{cases}\dfrac{-x}{a_{i+1}-a_i}+\dfrac{a_{i+1}}{a_{i+1}-a_i}, a_i<x\leqslant a_{i+1}\\ 0\end{cases}\\ u_{i+1}(x)=\begin{cases}0\\ \dfrac{x}{a_{i+1}-a_i}-\dfrac{a_{i+1}}{a_{i+1}-a_i}, a_i<x\leqslant a_{i+1}\end{cases}\end{cases} \tag{6}$$

式中,a_i、a_{i+1} 为不同风险等级下测量值 x 的中间值。

令 $u_{ik}=(u_{i1},u_{i2},\cdots,u_{ip})$ 为评价样本,$R_i(R_i\in C_k)$ 属于第 k 级风险等级 C_k 的程度,则 u_{ik} 必然满足:

$$0\leqslant u_{ik}\leqslant 1 \tag{7}$$

4.1.4 距离判别评价

采用距离判别法作为属性判别法则,令 d_k 为多指标综合测度 u_{ik} 到风险等级 C_k 的距离。其计算公式如下:

$$\begin{cases} d_1=\sqrt{(u_{i1}-1)^2+(u_{i2}-0)^2+(u_{i3}-0)^2+(u_{i4}-0)^2}\\ d_2=\sqrt{(u_{i1}-0)^2+(u_{i2}-1)^2+(u_{i3}-0)^2+(u_{i4}-0)^2}\\ d_3=\sqrt{(u_{i1}-0)^2+(u_{i2}-0)^2+(u_{i3}-1)^2+(u_{i4}-0)^2}\\ d_4=\sqrt{(u_{i1}-0)^2+(u_{i2}-0)^2+(u_{i3}-0)^2+(u_{i4}-1)^2}\end{cases} \tag{8}$$

则对象的分级等级为 $\min d_k(1\leqslant k\leqslant 4)$。

4.2 案例边坡评价分析

影响矿山边坡稳定性的因素众多,通过查阅相关资料并结合现场实际情况,将影响边坡稳定性的因素分为地形和地貌条件、岩土条件、气象条件三大类[14]。并将这三类因素进一步细化为 10 项评价指标。其中,地质条件细化为边坡高度、原始坡角、坡面形态、地层厚度;岩土条件细化为容重、内摩擦角、黏聚力、地下水;气象条件细化为年均最大降水量、日均最大降水量。

根据数值模拟结果,最大位移区、塑性区以及最小安全系数均靠近第三级边坡,因此,为进一步验证该矿山边坡的稳定性,选取该露天矿山第三级边坡(强风化泥岩层边坡)作为评价对象。通过对现场工程地质条件、水文地质条件等情况进行调研,得到该露天矿山边坡的各项指标,见表 3。

表 3 某矿山边坡各项指标数据

Table 3 The index data of a mine slope

因素	评价指标	单位	实测数据
地形和地貌条件	边坡高度	m	35
	原始坡角	(°)	27.5
	坡面形态	—	平面
	地层厚度	m	3.0
岩土条件	容重	kN/m^3	22.5
	黏聚力	kPa	115
	内摩擦角	(°)	20
	地下水	—	弱
气象条件	年均最大降水量	mm	1 490
	日均最大降水量	mm	50

4.3 边坡安全评价过程

根据边坡工程地质条件及专家建议,确定各指标的分级标准,得到该边坡安全分级标准及其赋值,见表 4。

根据未确知测度理论,首先确定单指标测度函数。常用的函数形式包括指数型分布、抛物线型分布和直线型分布,其中直线型分布应用最为广泛,具有操作简单和高效等优势。因此,本研究单指标测度函数采用直线型分布,如图 5 所示。

表 4 某矿山边坡安全评价指标

Table 4 Safety evaluation indexes of a mine slope

因素	指标	评价等级			
		安全(Ⅰ)	较安全(Ⅱ)	较不安全(Ⅲ)	不安全(Ⅳ)
地形和地貌条件	边坡高度	<10 m	10~20 m	20~40 m	>40 m
	原始坡角	<20°	20°~30°	30°~40°	>40°
	坡面形态	内凹(1)	平面(2)	介于平面与外凸(3)	外凸(4)
	地层厚度	>5 m	3~5 m	1~3 m	<1 m
岩土条件	容重	>25 kN/m^3	23~25 kN/m^3	21~23 kN/m^3	<21 kN/m^3
	黏聚力	>500 kPa	180~500 kPa	50~180 kPa	<50 kPa
	内摩擦角	>25°	20°~25°	12°~20°	<12°
	地下水	无或微(1)	弱(2)	较为丰富(3)	丰富(4)
气象条件	年均最大降水量	<600 mm	600~900 mm	900~1 200 mm	>1 200 mm
	日均最大降水量	<20 mm	20~50 mm	50~100 mm	>100 mm

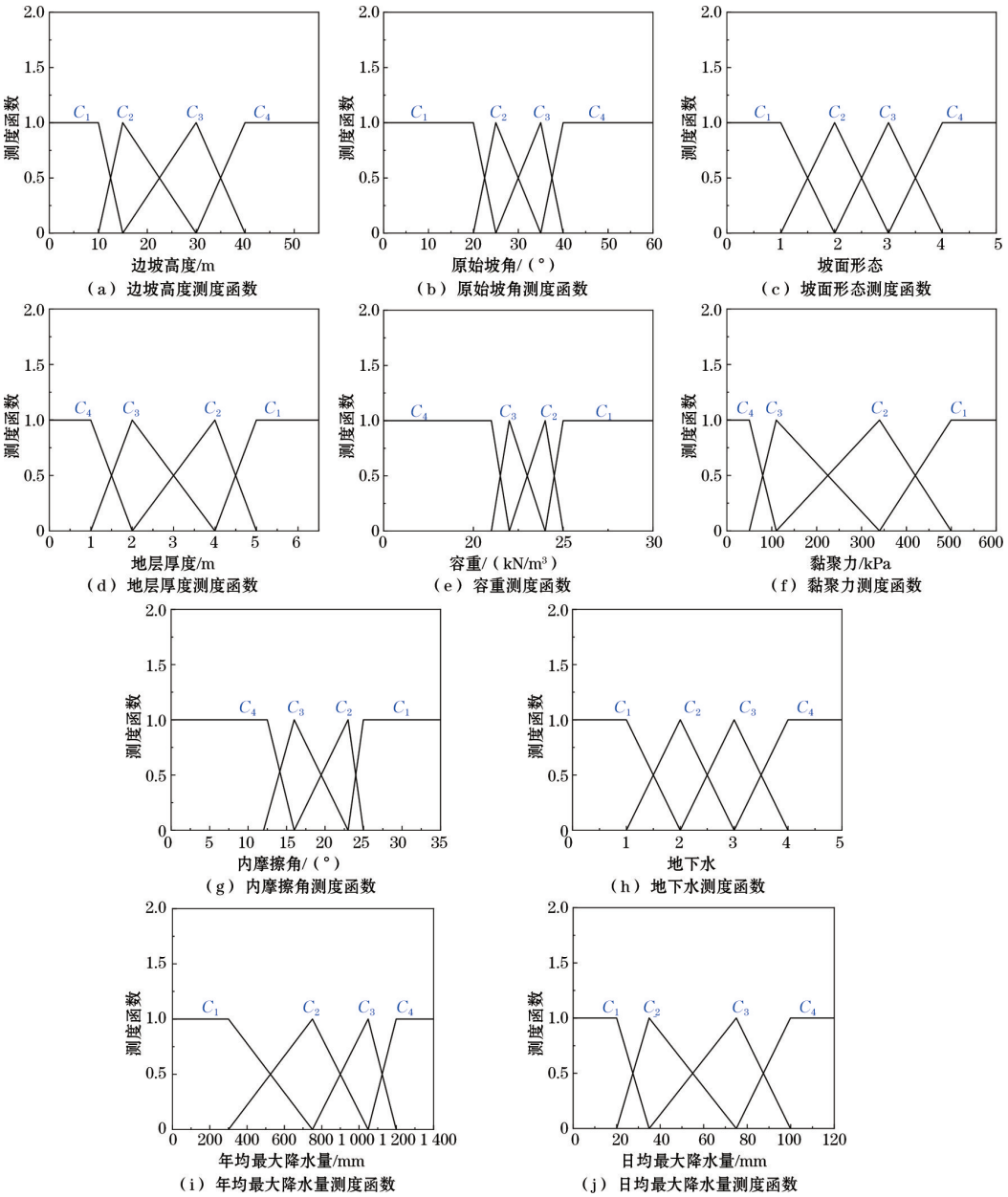


图 5　边坡各指标测度函数

Fig.5　Index measurement functions of slope

单指标评价矩阵如下：

$$(\boldsymbol{u}_{ijk})_{10\times4}=\begin{bmatrix}0&0&0.5&0.5\\0&0.75&0.25&0\\0&1&0&0\\0&0.5&0.5&0\\0&0.5&0.5&0\\0&0&1&0\\0&0.5&0.5&0\\0&1.0&0&0\\0&0&0&1\\0&0.625&0.375&0\end{bmatrix}$$

评价指标权重向量为：$\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}=(0.136\ 0,0.087\ 3,0.081\ 0,0.104\ 4,0.087\ 3,0.045\ 1,0.117\ 3,0.087\ 3,0.168\ 7,0.085\ 6)$。

综合测度向量为$(0,0.441\ 8,0.321\ 5,0.236\ 7)$。

通过距离判别公式可求得：$d_1=1.163\ 9$，$d_2=0.686\ 3$，$d_3=0.843\ 5$，$d_4=0.938\ 7$，即 $d_2<d_3<d_4<d_1$。依据最小未确知测度距离判别法，可得某露天矿山边坡评价等级为Ⅱ级。结合数值模拟分析结果可知，边坡整体呈现较安全的状态。在露天矿山运营期间，通过对该露天矿山边坡进行定期监测，并对局部不稳定区域采取加固措施、改善排水设施，运营

期内并未发生边坡事故,验证了未确知测度理论-有限元相结合的方法在边坡安全评价中的可靠性和实用性。

5 结论

本文以某露天矿山边坡为研究对象,采用有限元方法,从应力、位移、塑性区等方面对矿山边坡稳定性进行分析;采用多种定量分析法计算边坡安全系数,并选取存在一定失稳风险的第三级边坡,借助未确知测度理论进行安全评估,得出以下主要结论。

(1) 该矿山边坡的最大主应力和最小主应力自地表至底部岩层呈层状分布,且靠近地表的边坡受拉应力较大。边坡的最大位移主要发生在地表处,距离地表越远,水平位移、竖直位移和总位移均越小。靠近上部的第二级边坡主要呈现为抗拉状态,土层深部未进入塑性状态。

(2) 采用普通条分法、毕肖普法、简布法和极限平衡法分别计算得到的安全系数为 1.299,1.349,1.267和 1.345,均大于自然状态下永久边坡的安全系数 1.25,表明矿山边坡整体处于较为安全的状态,但仍存在一定的失稳风险。

(3) 基于未确知测度理论的评价结果表明,某矿山边坡评价等级为Ⅱ级,边坡整体呈现为较安全的状态。结合有限元分析可知,当遇到地震、暴雨等特殊工况时,边坡可能失稳。故在露天矿山运营期内,应加强对局部风险部位的监测和加固,并采取相应的防护措施。

参考文献(References):

[1] 祝经中,朱飞.某露天矿山高边坡稳定性分析研究[J].中国矿业,2024,33(增刊 1):124-127.
Zhu Jingzhong, Zhu Fei. Analysis and research on high slope stability of an open-pit mine[J]. China Mining Magazine, 2024,33(Suppl.1):124-127.

[2] An Bei, Wang Changchang, Liu Chen, et al. A multi-source remote sensing satellite view of the February 22nd Xinjing landslide in the mining area of Alxa left Banner, China[J]. Landslides,2023,20(11):2517-2523.

[3] 刘亮,徐森民,王迪,等.基于最优边坡角的露天矿山边坡稳定性分析与安全评价研究[J].中国矿业,2024,33(增刊 2):98-104.
Liu Liang, Xu Senmin, Wang Di, et al. Research on slope stability analysis and safety evaluation of open-pit mine based on optimal slope angle[J]. China Mining Magazine, 2024,33(Suppl.2):98-104.

[4] 许文浒,叶永飞.矿山废石堆场边坡稳定性影响因素研究[J].有色金属(矿山部分),2025,77(1):143-152.
Xu Wenhu, Ye Yongfei. Influencing factors accounting for slope stability of mine waste rock stockpile[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2025,77(1):143-152.

[5] 刘惠洋,张东亮,李光,等.复杂断层构造高陡边坡稳定性计算分析[J].有色金属(矿山部分),2025,77(1):38-44.
Liu Huiyang, Zhang Dongliang, Li Guang, et al. Stability calculation and analysis of high and steep slope with complex fault structure[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2025,77(1):38-44.

[6] 刘柳,江城龙,张竣.露天煤矿高陡边坡稳定性分析及隐患治理研究[J].中国煤炭,2024,50(12):108-114.
Liu Liu, Jiang Chenglong, Zhang Jun. Study on stability analysis and hidden hazards treatment of high and steep slope of open-pit coal mines[J]. China Coal,2024,50(12): 108-114.

[7] 赵明华,刘菁钰,赵衡,等.基于 MSDP 准则的岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):10-18.
Zhao Minghua, Liu Jingyu, Zhao Heng, et al. Stability analysis of rock slopes based on MSDP criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(1): 10-18.

[8] 尹永明,朱强,张小军,等.广东某建筑砂岩矿露天采场设计边坡稳定性分析[J].中国安全生产科学技术,2023,19(增刊 1):104-109.
Yin Yongming, Zhu Qiang, Zhang Xiaojun, et al. Stability analysis on desingned slope of a construction sandstone mine open pit in Guangdong[J]. Journal of Safety Science and Technolgy,2023,19(Suppl.1):104-109.

[9] Chen Xiaoying, Tang Chaosheng, Cheng Qing, et al. Analysis of the stability of cracked soil slopes using a numerical model incorporating stochastic theory [J]. Computers and Geotechnics,2024,167:106067.

[10] 荣光旭,马清清,高延超,等.ICS-Elman 神经网络在边坡稳定性分析中的应用[J].矿业研究与开发,2025,45(3): 213-221.
Rong Guangxu, Ma Qingqing, Gao Yanchao. et al. Application of ICS-Elman neural network on slope stability analysis[J]. Mining Research and Development, 2025, 45 (3):213-221.

[11] 杨飞,熊韶运,王靖,等.MSR 边坡雷达技术在露天矿高陡边坡监测和风险预警的应用[J].现代矿业,2024,40(11):114-116+149.
Yang Fei, Xiong Shaoyun, Wang Jing, et al. Application of MSR slope radar technology in monitoring and risk warning of high and steep slope in open-pit mine[J]. Modern Mining, 2024,40(11):114-116+149.

[12] 陈涛,郭浩宇,伊孜哈尔,等.地基合成孔径雷达在露天矿边坡监测预警中的应用[J].露天采矿技术,2024,39(5):5-8.
Chen Tao, Guo Haoyu, Yizihaer, et al. Application of ground-based synthetic aperture radar in open-pit mine slope monitoring and early warning [J]. Opencast Mining Technology,2024,39(5):5-8.

[13] 易富,孟兴涛,赵文华,等.基于因素空间的露天采坑边坡稳定性评价[J].地质科技通报,2023,42(5):1-9.
Yi Fu, Meng Xingtao, Zhao Wenhua, et al. Evaluation of slope stability of open pit based on factor space[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2023,42(5):1-9.

[14] 王杰,胡斌,李京,等.基于未确知测度理论的矿山边坡稳定性评价方法[J].中国有色金属学报,2021, 31(5):1388-1394.
Wang Jie, Hu Bin, Li Jing, et al. Slope stability evaluation and application of open-pit mine based on uncertainty measurement theory[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(5):1388-1394.

[15] 苗静.基于突变理论与模糊数学的边坡稳定性评价[J].江淮水利科技,2024(6):31-34.
Miao Jing. Slope stability evaluation based on mutation theory and fuzzy mathematics [J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology,2024(6):31-34.

[16] 曾伟,谢韶宜,王观石,等.基于 AHP 层次分析法的离子型稀土矿原地浸出边坡稳定评价研究[J].中国矿业,2023,32(4):72-80.
Zeng Wei, Xie Shaoyi, Wang Guanshi, et al. Study on slope stability evaluation system for ionic rare earth ore in-situ leaching process based on AHP[J]. China Mining Magazine, 2023,32(4):72-80

[17] 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+38.
Zhao Li, Li Zhengguo, Su Dengfeng, et al. Sensitivity analysis of slope stability influencing factors based on GRA-AHP combined range analysis composite algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(1):31-34+38.

[18] GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S].

[19] 刘巧梅,温海燕,李爱春,等.基于博弈论组合赋权-未确知测度理论的隧道突涌水风险评价[J].武汉大学学报(工学版),2023,56(7):799-806.
Liu Qiaomei, Wen Haiyan, Li Aichun, et al. Risk assessment of tunnel water inrush based on game theory combinatorial weighting-unascertained measure theory[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2023,56(7):799-806.