

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.11.040

一种改进的公路边坡稳定性模糊评价方法研究

阮 航, 张勇慧, 朱泽奇, 王 进

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩石力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 考虑影响公路边坡稳定性信息的不完整性、随机性和模糊性, 以最大熵原理和工程模糊集理论为基础, 并采用综合赋权法确定指标权重, 提出了一种改进的公路边坡稳定性模糊评价方法。该模型充分利用影响因素的信息, 以广义加权距离表示待评价样本与标准样本的差异, 从优化条件中获得相对隶属度, 并依据加权平均原则对边坡样本等级进行识别。该模型应用于常吉和吉怀高速公路边坡稳定性评价中, 将评价结果与模糊综合模型和属性识别模型的结果以及边坡实际情况进行对比验证, 体现了其较好的一致性, 并且结果更合理。同时, 该模型具有较小的信息熵值, 表明其评价的不确定性小, 可靠性较高, 是一种边坡稳定性评价分析新方法, 可在相关工程领域中应用推广。

关 键 词: 岩质边坡; 最大熵原理; 相对隶属度; 综合赋权; 加权平均原则; 稳定性评价

中图分类号: TD 854.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)11-3337-08

An improved fuzzy method for evaluating stability of highway slopes

RUAN Hang, ZHANG Yong-hui, ZHU Ze-qi, WANG Jin

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In consideration of the imperfection, randomness and ambiguity of the information for stability analysis of highway slopes, an improved fuzzy evaluation method is put forward to assess the stability of highway slopes based on the maximum entropy principle and the engineering fuzzy set theory. In this method, the comprehensive empowering method is adopted to determine the weight of index. The procedure makes full use of the information of the factors influencing stability of highway slopes, and uses the generalized weighted distance to represent the difference between slope sample and standard sample. The relative membership degree is obtained by conditions' optimization, the grades of the slope samples are identified according to the weighted average principle. The procedure is applied to Changde-Jishou and Jishou-Huaihua highway in Hunan province to analyze the stability of rock slopes. It is found that the assessment results agree well with the results obtained with the fuzzy comprehensive evaluation method, the attribute recognition method and the practical condition of slopes, showing that the new procedure is more reasonable. Furthermore, the Shannon entropy value of the model is smaller, which indicates less uncertainty and higher reliability of the evaluated results.

Keywords: rock slope; maximum entropy principle; relative membership degree; comprehensive empowering; weighted average principle; stability evaluation

1 引 言

由于公路边坡稳定性评价信息具有不完整性、多重性和不确定性, 因此, 其稳定性评价一直是岩土工程中的热点与难点。边坡稳定性评价方法大致分为两大类, 即定性分析法和定量分析法。定性分析方法主要有工程地质分析法、边坡稳定性分析数

据库和专家系统法、图解法、SMR 分类法等, 这些方法大多都是以地质信息积累和工程经验为基础, 不确定性因素太多, 没有统一的评价标准; 边坡定量分析方法主要有极限平衡方法和连续介质的分析方法、非连续介质的分析方法以及流形元法等数值方法。然而, 边坡稳定性的影响因素太多, 其随机性和实效性很强, 这些方法都需要经过大量假设处

收稿日期: 2014-04-11

基金项目: 国家 973 国家重点基础研究发展计划 (No.2010CB732001); 国家自然科学基金 (No.11272331, No.51279202)。

Foundation item: Project supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant No.2010CB732001) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.11272331 and 51279202).

第一作者简介: 阮航, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程稳定性评价及安全监测系统的研究工作。E-mail: hruan@whrsm.ac.cn

理, 并且建立的地质模型以及选取的参数和模拟施加的荷载等都存在局限性和差异性, 因此, 定量分析方法同样缺乏一定的真实性和可靠性, 只能作为实际工程的参考。综合考虑两种方法的优缺点, 许多学者又相继提出了将定性分析与定量分析相结合的方法, 如模糊综合评判法^[1-3]、属性测度识别法^[4]、可靠度(概率)分析法^[5]、人工神经网络方法^[6]、灰色聚类法^[7]、突变理论^[8]等, 其中最常用的是模糊综合评判法, 其在其他工程领域也有许多应用^[9-12]。但模糊综合评判中隶属函数的选取具有主观性, 不同的人或用不同的判断标准, 所得出的各元素的隶属度也不尽相同^[2, 11-12]。同时, 模糊数学分类结果在取大取小的运算中损失了许多中间值信息, 出现了分级不清, 不能比较更细微地分类程度的现象^[13]。

本文综合考虑影响公路边坡稳定性信息的模糊性、随机性和不完整性, 提出一种改进的模糊评价模型, 该模型是将综合赋权法、最大熵原理以及相对隶属度理论结合起来, 充分利用影响岩质边坡稳定性因素的信息, 从条件规划中优化获取相对各级别的隶属度, 最后依据加权平均原则, 细致客观地对边坡稳定性进行评价。该方法逻辑严密, 综合了主、客观因素, 以最大限度地减少各种不确定性, 可得出科学合理的结果。

将该模型应用于常吉和吉怀高速公路边坡稳定性评价, 并与模糊综合评判模型和属性识别模型进行比较。

2 基本概念及理论

2.1 信息熵、最大熵原理

熵, 原本是一种热力学概念, 1948年, Shannon^[14]最先将其引入到信息论中, 他把通讯过程中信源讯号的平均信息量称为熵, 即信息熵, 用以表示系统的稳定程度、不确定性和信息量。从热力学第二定律可知, 任何改变都不会引起一个孤立物质系统的熵的减少。1957年, 基于这种熵恒增定律, Jaynes^[15-16]在统计力学中提出了最大熵原理(POME), 他认为, 在不定问题所有的可行解中, 应选其中熵值最大的一个解。熵最大, 意味着相对于未知的信息来说, 所得到的解是在有限信息条件下最客观, 最无偏见的。

定义 若随机事件有 n 个可能的结果, 每个结果出现的概率为 $p_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$,

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (1)$$

式中: H 为信息熵的熵函数, 反映物质系统内状态

的丰富程度或复杂程度, 用以度量此事件的信息量, 是一种态函数。由式(1)可知, 事件出现一种结果, 其 $p_i = 1$, 没有不确定性, $H = 0$; 若事件为等概率事件 ($p_i = 1/n$), H 取得最大值 $\ln n$, 表明对试验结果一无所知, 事件的不确定性最大。

2.2 工程模糊集理论中的相对隶属度理论

美国控制论专家 Zadeh^[17]正视了经典集合描述的“非此即彼”的清晰现象, 但生活中绝大多数事件表现出“亦此亦彼”的模糊现象, 因此, 他创造性地将普通集合论特征函数只取 $\{0, 1\}$ 推广到 $[0, 1]$ 区间上取值的隶属函数。但 Zadeh 提出的隶属函数的概念与定义在理论上存在惟一性的缺点, 表述上又缺乏作为数学定义的严谨性, 为此, 陈守煜^[18]提出了相对隶属度的定义, 形成了相对隶属度理论。

针对实际工程问题, 常常只需应用模糊集合理论确定相对隶属度, 另外, 计算相对隶属度远比确定绝对隶属度容易, 也能消除确定隶属度时带来的主观干扰。

2.3 综合赋权法

针对多指标对边坡稳定性影响程度的权重系数的确定, 常用的方法可分为主观赋权法和客观赋权法。前者是一种定性分析方法, 它基于决策者主观偏好或经验给出指标权重, 却不能反映评价指标的数字特性, 如 Delphi 法、AHP 法、模糊评价法等^[19]; 后者则是一种定量分析方法, 它基于指标的数据信息及其内在特性推导出来, 忽视了决策者的知识与经验, 把指标的重要性同等化, 不符合实际现象, 如熵权法、相似数相似权法、变异系数法等^[20]。为了避免主观赋权法所带来的人为干扰和客观赋权法的数据信息至上论, 本文采用兼顾主客观信息的综合赋权法^[21]。

3 改进模型

3.1 矩阵规格化预处理

设有待分级评价的 n 个样本 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$, 每个样本有 m 项评价指标 $I_j (j=1, 2, 3, \dots, m)$, 标准分级数为 K , 第 i 个样本的第 j 个评价指标 I_j 的值为 $x_{ij} (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m)$, 则有待评价样本的实测矩阵 $\mathbf{X} = [x_{ij}]_{nm}$, 各指标的分级标准值为 y_{jk} , 则评价分级标准矩阵 $\mathbf{Y} = [y_{jk}]_{mK}$ 。

为保证数据计算时的一致性与可比性, 需要对实测矩阵和分级标准矩阵进行相对隶属度的规格化^[22]。

若规定 1 级评价标准中评价指标 I_j 的标准 y_{j1} 规格化为相对隶属度 $s_{j1} = 0$, K 级评价标准中评价

指标 I_j 的标准 y_{jk} 规格化为相对隶属度 $s_{jk} = 1$ ，则可根据公式 (2) 确定 k 级评价标准中指标 j 的标准 y_{jk} 的相对隶属度为

$$s_{jk} = \frac{y_{jk} - y_{j1}}{y_{jk} - y_{j1}} \quad (2)$$

从而将评价分级标准矩阵 $Y = [y_{jk}]_{m \times K}$ 规格化为分级标准的相对隶属度矩阵 $S = [s_{jk}]_{m \times K}$ 。

同时，将样本实测矩阵 $X = [x_{ij}]_{nm}$ 规格化为相应的相对隶属度矩阵 $R = [r_{ij}]_{nm}$ 。

将指标值小者为优的指标实测值 x_{ij} 转化为相应的相对隶属度，其公式为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} < y_{j1}) \\ \frac{x_{ij} - y_{j1}}{y_{jk} - y_{j1}} & (y_{j1} \leq x_{ij} \leq y_{jk}) \\ 1 & (x_{ij} > y_{jk}) \end{cases} \quad (3)$$

相反地，对于指标值大者为优的指标实测值 x_{ij} 而言，转化公式为

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & (x_{ij} < y_{jk}) \\ \frac{x_{ij} - y_{j1}}{y_{jk} - y_{j1}} & (y_{j1} \leq x_{ij} \leq y_{jk}) \\ 0 & (x_{ij} > y_{j1}) \end{cases} \quad (4)$$

3.2 指标权重确定

本文权重为将主观层次分析法所得权重 $W' = (w'_j)_{1 \times m}$ 与客观熵权法所得权重 $W'' = (w''_j)_{1 \times m}$ 相结合而获得综合权重。

层次分析法简称 AHP 法^[23]，是美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代初提出的一种多目标多准则决策方法，该方法是基于在决策中大量因素无法定量地表达出来又无法回避决策过程中决策者的选择和判断所起到的决定作用。此法将评估目标分解成一个多级指标，对于每一层中各因素的相对重要性给出判断，通常引入 1~9 标度法（见表 1）进行量化两两比较，确定每一层全部因素的相对重要性

表 1 1~9 标度各因子重要性大小比较量化表
Table 1 Comparison of index importance of each factor of scale 1 to 9

标度	两两因子重要性比较说明
1	i 因素与 j 因素完全一样重要或 i 与 i 、 j 与 j 自身比较
3	i 因素比 j 因素稍微重要一点
5	i 因素比 j 因素明显重要
7	i 因素比 j 因素强烈重要
9	i 因素比 j 因素极为重要
2, 4, 6, 8	两因素重要性比较介于上述标度两值之间
倒数	上述重要性相反情况，即 j 比 i 重要的情况

次序，构造相应的判断矩阵，计算其最大特征根和对应的特征向量，特征向量归一化后即为各因素的权重 $W' = (w'_j)_{1 \times m}$ 。该方法判断矩阵的一致性问题是制约其应用的关键，当判断矩阵随机一致性比率 $C.R. < 0.1$ 时，即认为判断矩阵具有满意的一致性，说明权重分配是合理的。

熵权法^[24]是根据各指标的变异程度，利用信息熵计算各指标的熵权。根据信息论的基本原理，信息是系统有序程度的一个度量，而熵是系统无序程度的一个度量。当评价对象在某项指标上的值相差较大时，熵值较小，说明该指标提供的有效信息量较大，权重也应较大；反之，若某项指标的值相差越小，熵值较大，说明该指标提供的信息量较小，权重也应较小。计算步骤如下：

n 个待评价样本， m 项评价指标，则有评价样本实测矩阵 $X = [x_{ij}]_{nm}$ ，即

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}_{nm}$$

对该矩阵进行归一化，得到标准矩阵 $V = (v_{ij})_{nm}$ ，其中，对于大者为优的收益型指标而言，有

$$v_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i(x_{ij})}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (5)$$

而对于小者为优的成本型指标而言，有

$$v_{ij} = \frac{\max_i(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (6)$$

第 j 个指标熵 H_j 定义为

$$H_j = -t \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (7)$$

$$f_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum_{i=1}^n v_{ij}} \quad (8)$$

式中： t 为调节系数，为使得 $0 \leq H_j \leq 1$ ，取 $t = \frac{1}{\ln n}$ ；当 $\max_i(x_{ij}) = \min_i(x_{ij})$ 时，即 n 个样本在指标 j 上的值完全相等时， $H_j = 1$ ；当 $f_{ij} = 0$ 时， $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ ；从而可以得到熵权 $W'' = (w''_j)_{1 \times m}$ 为

$$w''_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)} \quad (9)$$

其中， $1 - H_j$ 是第 j 个指标的差异系数。

采用内积平均公式 (10) 或加权平均公式 (11) 进行集权。

$$w_j = \frac{(w'_j)^\alpha (w''_j)^\beta}{\sum_{j=1}^m (w'_j)^\alpha (w''_j)^\beta} \quad (10)$$

$$w_j = \alpha w'_j + \beta w''_j \quad (11)$$

式中: α , β 分别为主观权重与客观权重的相对重要程度, $0 \leq \alpha$, $\beta \leq 1$, $\alpha + \beta = 1$, 采用差异系数法^[25]确定:

$$T' = \frac{2}{m} (1p'_1 + 2p'_2 + \dots + mp'_m) - \frac{m+1}{m} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{m}{m-1} T', \quad \beta = 1 - \alpha \quad (13)$$

式中: T' 为主观权重向量 W' 各分量的差异系数; p'_1, p'_2, \dots, p'_m 为 W' 中各分量从小到大的重新排列。

3.3 评价模型

定义 μ_{ik} 为第 i 个待评价样本隶属于第 k 级样本的隶属度, 也可视为第 i 个样本属于第 k 级样本“概率”, 采用综合赋权法确定各指标的权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_m)$, 并以广义加权距离 D_{ik} 表示第 i 个待评价样本与第 k 级样本的差异, 其表达式为

$$D_{ik} = \mu_{ik} \sum_{j=1}^m (w_j |r_{ij} - s_{jk}|) \quad (14)$$

μ_{ik} 的确定, 一方面应使全体待评价样本与评价标准的加权广义距离之和最小; 同时, 为了减少随机性和模糊性所带来的不确定性, 根据最大熵原理, 应该使全体的信息熵最大。因此, 为求这类问题的满意解, 需采用加权法构造单目标规划:

$$\min_{\mu_{ik}} Y = D - \frac{1}{\eta} H = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \left[\mu_{ik} \sum_{j=1}^m (w_j |r_{ij} - s_{jk}|) + \frac{1}{\eta} \mu_{ik} \ln \mu_{ik} \right] \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K \mu_{ik} = 1, \quad 0 \leq \mu_{ik} \leq 1 \quad (16)$$

式中: 正权数 η 是对两个规划目标进行平衡, 根据实际问题进行取值, 本文取 10。

最后, 根据 Lagrange 乘子法求极值,

$$L(\mu_{ik}, \lambda) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \left[\mu_{ik} \sum_{j=1}^m (w_j |r_{ij} - s_{jk}|) + \frac{1}{\eta} \mu_{ik} \ln \mu_{ik} \right] + \lambda \left(\sum_{k=1}^K \mu_{ik} - 1 \right) \quad (17)$$

式中: λ 为 Lagrange 乘子, 最后可得

$$\mu_{ik} = \frac{e^{-\eta \sum_{j=1}^m (w_j |r_{ij} - s_{jk}|)}}{\sum_{k=1}^K e^{-\eta \sum_{j=1}^m (w_j |r_{ij} - s_{jk}|)}} \quad (18)$$

3.4 评价识别

为避免最大隶属度原则失效或低效问题^[26], 有效利用全部的相对隶属度信息, 本文利用加权平均原则^[27]对评价样本进行分级:

$$A_i = \sum_{k=1}^K k \mu_{ik}^C \quad (19)$$

式中: C 为待定系数, 一般取 1 或 2; k 为评价等级; A_i 为样本 i 所隶属的等级值, 通常 A_i 是一个非整数。

4 算例分析

用本文模型对常吉高速公路 15 组边坡数据和吉怀高速 10 组边坡数据进行评价分析 (见表 2), 以实现该方法的应用。选用公路岩质边坡 14 个评判指标^[2], 即自然坡高、自然坡角、坡面形态、植被发育特征、岩体结构、岩性及岩性组合、结构稳定特征、风化程度、地下水、开挖高度比、开挖坡脚、开挖方式、降雨强度和历时以及地震烈度。将边坡等级分为 5 个等级: 稳定 (I 级)、较稳定 (II 级)、基本稳定 (III 级)、较不稳定 (IV 级)、不稳定 (V 级)。

根据层次分析法, 可得各指标的主观权重 $W' = (0.055 \ 1, 0.107 \ 3, 0.042 \ 4, 0.017 \ 3, 0.198 \ 0, 0.067 \ 6, 0.116 \ 6, 0.023 \ 1, 0.039 \ 6, 0.050 \ 9, 0.092 \ 6, 0.028 \ 0, 0.109 \ 9, 0.051 \ 6)$; 根据熵权法, 可确定常吉高速公路边坡各指标客观权重向量 $W'' = (0.040 \ 0, 0.077 \ 1, 0.084 \ 8, 0.084 \ 8, 0.057 \ 9, 0.046 \ 3, 0.031 \ 9, 0.047 \ 4, 0.035 \ 1, 0.317 \ 4, 0.177 \ 7, 0, 0, 0)$, 吉怀高速公路边坡各指标客观权重 $W'' = (0.055 \ 6, 0.192 \ 4, 0, 0.063 \ 1, 0.209 \ 8, 0.063 \ 1, 0.050 \ 1, 0.039 \ 2, 0, 0.225 \ 7, 0.100 \ 9, 0, 0, 0)$ 。公式 (12)、(13) 可得 $\alpha = 0.4$, $\beta = 0.6$, 则常吉高速公路边坡各指标综合权系数 $W = (0.045 \ 8, 0.089 \ 1, 0.067 \ 8, 0.057 \ 8, 0.114 \ 0, 0.054 \ 8, 0.065 \ 8, 0.037 \ 7, 0.036 \ 9, 0.210 \ 8, 0.143 \ 7, 0.011 \ 2, 0.044 \ 0, 0.020 \ 6)$, 吉怀高速公路边坡各指标综合权系数 $W = (0.055 \ 4, 0.158 \ 4, 0.017 \ 0, 0.044 \ 8, 0.205 \ 1, 0.064 \ 9, 0.076 \ 7, 0.032 \ 8, 0.015 \ 8, 0.155 \ 8, 0.097 \ 6, 0.011 \ 2, 0.044 \ 0, 0.020 \ 6)$ 。

按照最大熵原理的相对隶属度模糊评价模型, 计算各样本的相对各等级的隶属度, 再利用加权平均原则进行评价分级, 并将结果与模糊综合评判法^[2]和属性识别法^[4]得到的结果进行验证对比, 同时与边坡实际稳定情况进行对比, 结果见表 2。

表 2 边坡样本评价结果及 3 种模型评价结果比较
Table 2 Evaluation results of slope samples and comparison among three models

边坡样本	评价等级					加权 平均后	本文模型 评价结果	模糊综合 评判模型	属性识别 模型	实际情况	
	1	2	3	4	5						
常吉 高速 公路	1	0.042 422	0.223 572	0.418 610	0.271 513	0.043 883	3.050 863	III	III	III	稳定
	2	0.130 137	0.455 627	0.376 354	0.007 519	0.030 364	2.352 345	II(偏III)	III	II	稳定
	3	0.052 646	0.183 617	0.444 183	0.275 092	0.044 461	3.075 105	III	III	III	稳定
	4	0.039 091	0.142 265	0.290 430	0.454 721	0.073 493	3.381 260	III(偏IV)	III	IV	失稳
	5	0.053 291	0.185 866	0.449 624	0.267 917	0.043 301	3.062 070	III	III	III	稳定
	6	0.055 349	0.257 733	0.416 725	0.242 165	0.028 027	2.929 788	III	III	III	稳定
	7	0.029 134	0.126 920	0.402 753	0.379 808	0.061 385	3.317 390	III(偏IV)	III	IV	失稳
	8	0.083 391	0.291 965	0.330 569	0.231 947	0.062 129	2.897 456	III	III	III	失稳
	9	0.080 621	0.282 266	0.319 587	0.246 963	0.070 563	2.944 582	III	III	III	失稳
	10	0.040 540	0.170 697	0.408 545	0.359 942	0.020 277	3.148 719	III	III	IV	稳定
	11	0.085 076	0.358 221	0.348 236	0.194 227	0.014 240	2.694 334	III(偏II)	III	II	稳定
	12	0.057 547	0.323 502	0.357 199	0.225 333	0.036 419	2.859 575	III	III	II	稳定
	13	0.083 412	0.290 919	0.373 526	0.217 061	0.035 082	2.829 483	III	III	II	稳定
	14	0.098 334	0.354 844	0.341 505	0.176 750	0.028 567	2.682 370	III(偏II)	III	II	稳定
	15	0.051 669	0.248 930	0.423 526	0.236 220	0.039 656	2.963 263	III	III	III	稳定
吉怀 高速 公路	1	0.133 328	0.547 383	0.242 333	0.072 056	0.004 900	2.267 816	II	II	II	稳定
	2	0.127 966	0.525 369	0.232 587	0.102 096	0.011 982	2.344 760	II(偏III)	III	II	稳定
	3	0.103 079	0.338 270	0.417 559	0.126 273	0.014 820	2.611 485	III(偏II)	III	III	稳定
	4	0.223 018	0.342 272	0.278 886	0.135 956	0.019 867	2.387 381	II(偏III)	III	II	稳定
	5	0.036 805	0.185 546	0.528 564	0.216 937	0.032 148	3.022 078	III	III	III	稳定
	6	0.034 431	0.173 577	0.492 977	0.260 422	0.038 593	3.095 169	III	III	III	稳定
	7	0.028 178	0.142 052	0.446 480	0.338 365	0.044 925	3.229 809	III(偏IV)	III	IV	失稳
	8	0.095 539	0.418 409	0.326 110	0.143 149	0.016 792	2.567 246	III(偏II)	III	II	稳定
	9	0.085 756	0.432 323	0.338 784	0.129 363	0.013 774	2.553 076	III(偏II)	III	II	稳定
	10	0.056 089	0.236 076	0.513 038	0.174 337	0.020 461	2.867 005	III(偏II)	III	III	稳定

由表 2 可知，本文模型与模糊综合评价模型以及属性识别模型的评价结果基本一致，而当模糊综合评判法与属性识别法对评价样本产生分歧时，本文模型评价结果可以进行协调，并且其描述的结果更细致合理一些，如常吉公路边坡样本 2、4、7、11、14（见图 1）以及吉怀公路边坡样本 2、3、4、8、9、10（见图 2）。同时，就边坡实际稳定情况而言，除了常吉公路边坡样本 8、9 外，该模型的评价结果与实际情况吻合较好，可行性较强。

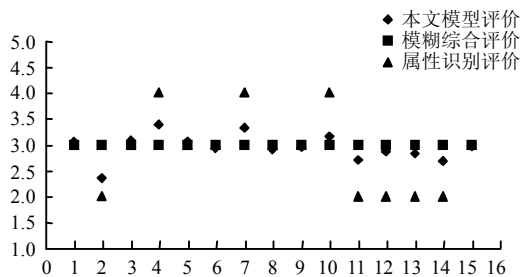


图 1 常吉公路边坡三评价模型评价结果比较
Fig.1 Evaluation results of Changde-Jishou highway slopes and comparison among three models

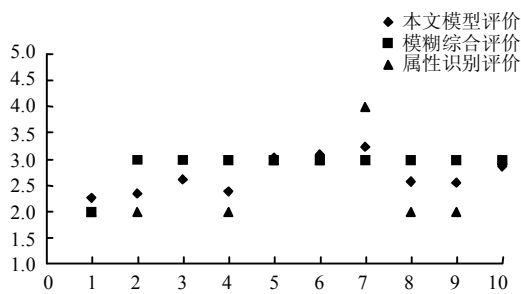


图 2 吉怀公路边坡三评价模型评价结果比较
Fig.2 Evaluation results of Jishou-Huaihua highway slopes and comparison among three models

为了证明本文模型比模糊综合评判模型以及属性识别模型在一定程度上减少了不确定性，本文以评价的边坡样本为例，采用熵值公式计算 3 种模型评价过程的不确定性。由图 3、4 可知，本文方法的信息熵完全小于模糊综合评价模型的，而除了常吉公路边坡样本 4、8、9、11 和吉怀公路边坡样本 2 5 个样本外，其余样本评价结果的信息熵几乎属性识别模型的要小。从此可看出，本文模型进行评价的不确定性小，可靠性较高。

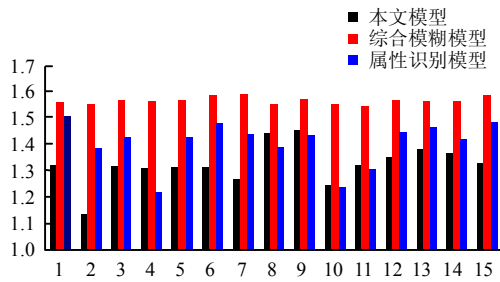


图3 常吉公路边坡样本三种模型评价结果的信息熵
Fig.3 Entropy about the evaluation results of Changde-Jishou highway slope samples obtained from three models

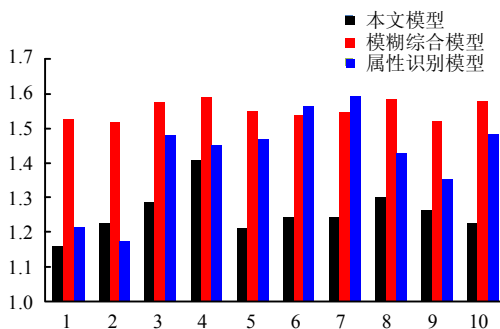


图4 吉怀公路边坡样本3种模型评价结果的信息熵
Fig.4 Entropy about the evaluation results of Jishou-Huaihua highway slope samples obtained from three models

5 结论

(1) 本文提出了对层次分析法和熵权法进行集权的综合赋权法,该方法既考虑了专家的主观偏好或经验,又综合了各指标的数据信息及其内在特性,运用该方法进行权重确定,可得出科学合理的结果。

(2) 基于最大熵原理的模糊评价模型,通过条件优化处理,改进了隶属度的计算,完全避免了隶属函数的主观选择,评价结果客观真实,可信度较高。另外,其计算过程清晰简便,容易进行计算机编程,大大降低了处理数据信息的工作量。

(3) 本文模型在对公路边坡稳定性评价,并与模糊综合评价模型以及属性识别模型进行比较过程中,体现了它较好的一致性和可行性,评价结果更加细致合理。同时,该模型的评价结果与边坡的实际稳定情况吻合较好,较为贴近实际。此外,通过熵值的计算,本文模型具有较小的信息熵,评价的不确定性小,可靠性较高。

总之,针对公路边坡稳定性评价中的不确定性和信息有限性等问题,基于综合赋权法下最大熵原理的模糊评价方法为其提供了一条新的途径,该方法可靠性较高,并可在相关工程领域中应用推广。

参考文献

- [1] 孟衡. 模糊数学在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程技术, 2008, 22(4): 178—181.
MENG Heng. Application of fuzzy mathematics to rock-slope stability analysis[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2008, 22(4): 178—181.
- [2] 张勇慧, 李红旭, 盛谦, 等. 基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3151—3156.
ZHANG Yong-hui, LI Hong-xu, SHENG Qian, et al. Study of stability gradation of highway rock slopes based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3151—3156.
- [3] 黄建文, 李建林, 周宜红. 基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2627—2632.
HUANG Jian-wen, LI Jian-lin, ZHOU Yi-hong. Application of fuzzy analysis based on AHP to slope stability evaluation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.1): 2627—2632.
- [4] 文畅平. 黄土边坡稳定性的属性识别模型[J]. 水利水电工程学报, 2007, 2(2): 10—16.
WEN Chang-ping. Attribute recognition model for loess slope stability[J]. *Hydro-science and Engineering*, 2007, 2(2): 10—16.
- [5] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 1—347.
ZHU Yu-xue. Reliability analysis of slopes[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 1—347.
- [6] 夏元友, 李新平, 朱瑞庚. 基于人工神经网络的边坡稳定性工程地质评价方法[J]. 岩土力学, 1996, 17(3): 27—33.
XIA Yuan-you, LI Xin-ping, ZHU Rui-geng. Engineering geology evaluation method for slope stability based on artificial neural network[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1996, 17(3): 27—33.
- [7] 谢全敏, 夏元友. 岩体边坡稳定性的可拓聚类预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 438—441.
XIE Quan-min, XIA Yuan-you. Extension classification prediction method for the stability of rock-mass slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(3): 438—441.

- [8] 赵志峰, 徐卫亚. 基于突变理论的边坡安全稳定性综合评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 2707—2711.
ZHAO Zhi-feng, XU Wei-ya. Comprehensive assessment of slope safety and stability based on catastrophe theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 2707—2711.
- [9] 徐传华, 任青文. 地下工程围岩稳定性的模糊综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1852—1855.
XU Chuan-hua, REN Qing-wen. Fuzzy synthetically evaluation on stability of surrounding rock masses of underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(11): 1852—1855.
- [10] 王彪, 郑明新, 张旭东. 昌北千枚岩风化程度的模糊综合评判[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(2): 4—8.
WANG Biao, ZHENG Ming-xin, ZHANG Xu-dong. Fuzzy synthetic evaluation of weathering degree of phyllite in Changbei[J]. **Journal of East China Jiaotong University**, 2007, 24(2): 4—8.
- [11] 余常贵, 王文秀. 模糊数学在大气环境质量评价中的应用[J]. 重庆环境科学, 1991, 13(1): 28—32.
YU Chang-gui, WANG Wen-xiu. Application of fuzzy mathematics to evaluation of atmosphere environment quality[J]. **Chongqing Environmental Science**, 1991, 13(1): 28—32.
- [12] 刘大伟, 郭伟平. 模糊综合评判在场地分类中的应用[J]. 山西建筑, 2009, 35(29): 98—100.
LIU Da-wei, GUO Wei-ping. On application of fuzzy comprehensive evaluation in site classification[J]. **Shanxi Architecture**, 2009, 35(29): 98—100.
- [13] 程乾生. 属性集和属性综合评价系统[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(9): 1—8.
CHENG Qian-sheng. Attribute sets and attribute synthetic assessment system[J]. **Systems Engineering-Theory & Practice**, 1997, 17(9): 1—8.
- [14] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. **Bell Systems Technical Journal**, 1948, 27(3): 379—428.
- [15] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics I [J]. **Phys. Rev.**, 1957, 106: 620—630.
- [16] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics II [J]. **Phys. Rev.**, 1957, 108: 171—190.
- [17] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. **Information and Control**, 1965, 8(3): 338—35.
- [18] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 1—21.
CHEN Shou-yu. Engineering fuzzy set theory and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 1—21.
- [19] 李因果, 李新春. 综合评价模型权重确定方法研究[J]. 辽东学院学报(社会科学报), 2007, 9(2): 92—97.
LI Yin-guo, LI Xin-chun. Weight determination of comprehensive evaluation model[J]. **Journal of Eastern Liaoning University(Social Sciences)**, 2007, 9(2): 92—97.
- [20] 庞彦军, 刘开第, 张博文. 综合评价系统客观性指标权重的确定方法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 8: 37—42.
PANG Yan-jun, LIU Kai-di, ZHANG Bo-wen. The method of determining the objective index weight in the synthetic evaluation system[J]. **Systems Engineering-Theory & Practice**, 2001, 8: 37—42.
- [21] 王书吉, 姚兰, 李飞, 等. 综合赋权法在灌区节水改造评价中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 614—616.
WANG Shu-ji, YAO Lan, LI Fei, et al. Application of combination weighting method in evaluation of water-saving reform project in irrigation district[J]. **Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)**, 2008, 27(4): 614—616.
- [22] 王栋, 朱元甦. 基于最大熵原理的水环境模糊优化评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 56—60.
WANG Dong, ZHU Yuan-sheng. POME-based fuzzy optimal evaluation model of water environment[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences Edition)**, 2002, 30(6): 56—60.
- [23] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
XU Shu-bo. The principle of analytic hierarchy process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988.
- [24] 赵博, 徐卫亚, 梁桂兰. 基于熵权的边坡稳定性评价物元可拓模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 119—123.
ZHAO Bo, XU Wei-ya, LIANG Gui-lan. Matter element extension model for evaluation of slope stability based on entropy weight and its application[J]. **Water Resources and Power**, 2013, 31(1): 119—123.
- [25] 刘宏. 综合评价中指标权重确定方法的研究[J]. 河北工业大学学报, 1996, 25(4): 75—80.
LIU Hong. A Study on the determination of the weight of Index in synthetic assessment[J]. **Journal of Hebei**

University of Technology, 1996, 25(4): 75—80.

- [26] 陈耀辉, 孙春燕. 模糊综合评判法中的最大隶属原则有效度[J]. 重庆师范学院学报(自然科学), 2001, 18(1): 45—47.

CHEN Yao-hui, SUN Chun-yan. A study of the validity of the maximum subordination principle for the fuzzy comprehensive evaluation method[J]. **Journal of Chongqing Normal University(Natural Science Edition)**, 2001, 18(1): 45—47.

- [27] 陈耀辉, 孙春燕. 对最大隶属原则有效度的进一步研究[J]. 重庆师范学院学报(自然科学), 2002, 9(1): 47—49.

CHEN Yao-hui, SUN Chun-yan. Further study of validity for the maximum subordination principle[J]. **Journal of Chongqing Normal University(Natural Science Edition)**, 2002, 9(1): 47—49.

上接第 3328 页

- [23] YANG B H, WU A X, WANG C L, et al. Three-dimensional simulation of pore scale fluid flow in granular ore media with realistic geometry[J]. **Transactions of Nonferrous Metals**, 2012, 22: 3081—3086.

- [24] BODLA K K, GARIMELLA S V, MURTHY J Y. 3D reconstruction and design of porous media from thin sections[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2014, 73: 250—264.

- [25] GÁLVEZ A, IGLESIAS A. Particle swarm optimization for non-uniform rational B-spline surface reconstruction from clouds of 3D data points[J]. **Information Sciences**, 2012, 192: 174—192.

- [26] GÁLVEZ A, IGLESIAS A. A new iterative mutually coupled hybrid GA-PSO approach for curve fitting in manufacturing[J]. **Applied Soft Computing**, 2013, 13: 1491—1504.

- [27] WANG J, GU D X, YU Z Y, et al. A framework for 3D model reconstruction in reverse engineering[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2012, 63: 1189—1200.

- [28] BÉNIÈRE R, SUBSOL G, GESQUIÈRE G, et al. A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models[J]. **Computer-Aided Design**, 2013, 45: 1382—1394.

- [29] 刘中华, 徐素国, 胡耀青, 等. 钙芒硝盐岩溶蚀试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3616—3621.
LIU Zhong-hua, XU Su-guo, HU Yao-qing, et al. Experimental study of corrosion of glauberite salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(S2): 3616—3621.

- [30] 肖晓春, 徐军, 潘一山, 等. 功率超声影响的煤中甲烷气促解规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 65—71.

XIAO Xiao-chun, XU Jun, PAN Yi-shan, et al. Experimental study of promoting methane desorption law in coal considering power ultrasound effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(1): 65—71.

- [31] ZHU X L, AI S G, LU X F, et al. Collapse models of aluminum foam sandwiches under static three-point bending based on 3D geometrical reconstruction[J]. **Computational Materials Science**, 2014, 85: 38—45.

- [32] ZHU X L, AI S G, LU X F, et al. Thermal conductivity of closed-cell aluminum foam based on the 3D geometrical reconstruction[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2014, 72: 242—249.

- [33] YANG B H, WU A X, MIAO X X, et al. 3D characterization and analysis of pore structure of packed ore particle beds based on computed tomography images[J]. **Transactions of Nonferrous Metals**, 2014, 24: 833—838.

- [34] YOO D J. Three-dimensional surface reconstruction of human bone using a B-spline based interpolation approach[J]. **Computer-Aided Design**, 2011, 43: 934—947.

- [35] 李长圣, 张丹, 王宏宪, 等. 基于 CT 扫描的土石混合体三维数值网格的建立[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2731—2736.

LI Chang-sheng, ZHANG Dan, WANG Hong-xian, et al. 3D mesh generation for soil-rock mixture based on CT scanning[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2731—2736.