

# 边坡稳定性主客观权重模糊模式识别分析

王旭华<sup>1,2</sup>, 陈守煜<sup>1</sup>, 陈雄<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘要:** 边坡稳定性分析中影响因素众多, 具有随机性和模糊性的特点, 常采用各种模糊综合评价方法进行边坡稳定性分析。但在应用中, 很难找出一种合适的方法来确定各影响因素的权重, 通常是由专家凭经验给出权重大小, 具有一定程度的主观性和随意性, 使这类方法的应用受到了一定的限制。考虑到以上不足, 提出了边坡稳定性主客观权重多级模糊模式识别分析模型, 该模型采用模糊模式识别交叉迭代模型的客观方法确定权重的初始解, 然后视需要按二元比较模糊决策简捷方法对初始解作必要的主观调整, 使专家经验的重要性和数值计算的优越性得到了充分的体现。最后应用实例进行对比分析, 以说明其方法的合理性。

**关键词:** 边坡稳定性; 相对隶属函数; 主客观综合法; 模糊模式识别

**中图分类号:** TU 413.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)增1 - 5243 - 05

## ANALYSIS ON SLOPE STABILITY WITH FUZZY PATTERN RECOGNITION MODEL OF SUBJECTIVE AND OBJECTIVE WEIGHT DETERMINATION

WANG Xu-hua<sup>1,2</sup>, CHEN Shou-yu<sup>1</sup>, CHEN Xiong<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Civil and Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)

**Abstract:** The analysis of slope stability is influenced by numerous factors with vagueness and randomness. Although fuzzy comprehensive evaluation method is used to analyze slope stability, it is difficult to determine the weights of different factors appropriately, which are usually given by experts experientially. Thus, the application of the fuzzy comprehensive evaluation method is limited to certain extent. Considering the above-mentioned disadvantage, a multi-pole fuzzy pattern recognition model of subjective and objective weight determination is presented to analyze slope stability, in which the initial weights are given objectively by the alternative iteration model, and then, an appropriate adjustment may be made subjectively according to the simplified fuzzy decision method of two-element comparison. The importance of the expert and the advantage of the numerical calculation are fully considered in the model. The rationality of this method is shown by a comparative analysis of engineering case.

**Key words:** slope stability; relative membership function; subjective-objective comprehensive method for weight determination; fuzzy pattern recognition

## 1 引言

边坡稳定问题在土木工程中一直是一个十分重

要的问题。例如在高速公路、铁路、机场、运河等交通设施的建设, 房屋建筑和开挖工程中都需要进行稳定性分析。边坡工程的稳定性受到众多因素的影响, 有很多因素既难以确定, 又难以定量估计,

**收稿日期:** 2004 - 10 - 20; **修回日期:** 2004 - 12 - 21

**作者简介:** 王旭华(1964 -), 男, 1985年毕业于阜新矿业学院矿山测量专业, 现为博士研究生、大连大学建筑工程学院副教授, 主要从事边坡稳定性监测、分析预报及工程测量方面的教学与研究工作。E-mail: xhw8028@163.com。

因而边坡稳定性分析是不确定性问题，既有随机性，又有模糊性。目前，分析边坡变形破坏机理及评价其稳定性的方法主要为极限平衡和数值分析法，这些“精确”的分析方法在一些情况下是不适宜的。一方面，这些“精确”分析方法在反映参数的随机性和模糊性上有其局限性；另一方面大多数工程只需对边坡进行广义危险性识别，对边坡做出快速准确的判断。模糊综合评判方法能充分地考虑到边坡问题的不确定性与随意性，是一种评判边坡稳定性的有效方法，许多学者对此进行了研究<sup>[1~5]</sup>。但在这类应用中，权的确定一般都是依靠分析者的经验来进行，对于影响因素众多的边坡稳定性分析来说这是不够的，具有主观随意性，因而影响了模糊综合评判方法作用的发挥。为克服这一缺点，本文采用主客观综合法来确定影响因素的权重，并应用实例进行对比分析，以说明其方法的合理性。

## 2 主客观权重模糊模式识别分析理论

### 2.1 模糊模式识别交叉迭代模型

模式识别问题是在已知各种类型的情况下，识别给定的对象属于哪个类型。应用多级模糊模式识别理论模型求解模糊模式识别问题的内容是：已知若干个模式或标准样本，识别与计算研究对象属于各个模式的相对隶属度，计算相对状态(或级别)特征值，识别判断研究对象属于哪一个模式或标准样本<sup>[6]</sup>。

设对一模糊概念(如稳定性)进行识别的  $n$  个样本组成的集合，有  $m$  个指标特征值表示样本的整体特征，则样本集可用  $m \times n$  阶指标特征值矩阵表示为

$$X = [x_{ij}] \tag{1}$$

式中： $x_{ij}$  为样本  $j$  指标  $i$  的特征值( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ )。

若样本集依据  $m$  个指标按  $c$  个状态或级别的已知指标标准特征值进行识别，则有  $m \times c$  阶指标标准特征值矩阵为

$$Y = [y_{ih}] \tag{2}$$

式中： $y_{ih}$  为状态或级别  $h$  指标  $i$  的标准特征值，且  $i=1, 2, \dots, m; h=1, 2, \dots, c$ 。

通常按  $1 \sim c$  级指标标准特征值的增减把指标分为递减型(从 1 级至  $c$  级指标标准特征值减小)与递增型(从 1 级至  $c$  级指标标准特征值增加)两类，其指标相对隶属函数为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq y_{ic} \text{ 或 } x_{ij} \geq y_{ic}) \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & (y_{i1} > x_{ij} > y_{ic} \text{ 或 } y_{i1} < x_{ij} < y_{ic}) \\ 1 & (x_{ij} \geq y_{i1} \text{ 或 } x_{ij} \leq y_{i1}) \end{cases} \tag{3}$$

$h$  级指标标准特征值的相对隶属函数为

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & (y_{ih} = y_{ic}) \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & (y_{i1} > y_{ih} > y_{ic} \text{ 或 } y_{i1} < y_{ih} < y_{ic}) \\ 1 & (y_{ih} = y_{i1}) \end{cases} \tag{4}$$

设样本  $j$  隶属于级别  $h$  的相对隶属度为  $u_{hj}$ ，指标权向量为  $w = (w_i) (i = 1, 2, \dots, m)$ 。则样本  $j$  与级别  $h$  之间的差异可用加权广义欧氏权距离表示：

$$D_{hj} = u_{hj} \sqrt{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - s_{ih})]^2} \tag{5}$$

样本  $j$  与  $c$  个级别的差异的综合权衡度量可以表示为

$$f_j(u_j, w) = \sum_{h=1}^c D_{hj}^2 \tag{6}$$

对于  $n$  个样本，可建立目标函数：

$$\min \left\{ F(U, w) = \sum_{j=1}^n f_j(u_j, w) \right\} \tag{7}$$

满足约束条件：

$$\left. \begin{cases} \sum_{h=1}^c u_{hj} = 1 \quad (0 \leq u_{hj} \leq 1) \\ \sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (w_i > 0) \end{cases} \right\} \tag{8}$$

对式(7)进行求解，得到模糊模式识别交叉迭代模型：

$$w_i = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj} (r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj} (r_{kj} - s_{kh})]^2} \right\}^{-1} \tag{9}$$

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & (d_{kj} = 0, k \neq h) \\ \left( \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - s_{ik})]^2} \right)^{-1} & (d_{hj} \neq 0) \\ 1 & (d_{hj} = 0) \end{cases} \tag{10}$$

### 2.2 确定指标权重的、客观综合法

由于边坡稳定性分析中影响因素众多，分析(决策)者仅按经验常常难以迅速科学地给出指标权重的具体量值，而离开了分析(决策)者直接参与的稳定性分析又往往是不可靠的。采用主、客观综合法来确定影响因素的权，可以较好地解决这个问题。

所谓确定指标权重的、客观综合法，就是先按上面的模糊模式识别交叉迭代模型的客观方法确定指标权向量的初始解，如果该解基本符合分析(决策)者对指标权向量的经验判断与偏好，则不必调整指标权向量。否则需按确定指标权重的二元比较模糊决策分析简捷方法<sup>[7]</sup>对初始解进行调整。

$X =$

$$\begin{bmatrix} 30.50 & 29.10 & 19.60 & 20.00 & 47.90 & 0.00 & 0.00 \\ 60.00 & 30.50 & 17.50 & 25.00 & 60.00 & 9.00 & 0.25 \\ 50.00 & 51.30 & 17.50 & 25.00 & 60.00 & 9.00 & 0.25 \\ 50.00 & 51.30 & 18.00 & 29.00 & 90.00 & 9.00 & 0.50 \\ 42.00 & 51.30 & 19.00 & 20.00 & 100.00 & 0.00 & 0.00 \\ 105.00 & 35.00 & 19.00 & 20.00 & 100.00 & 0.00 & 0.00 \\ 45.00 & 51.30 & 18.30 & 27.00 & 75.00 & 0.00 & 0.00 \\ 45.00 & 51.30 & 18.30 & 27.00 & 75.00 & 8.00 & 0.00 \\ 50.00 & 55.00 & 18.70 & 26.00 & 93.00 & 0.00 & 0.00 \\ 50.00 & 55.00 & 18.70 & 26.00 & 93.00 & 8.00 & 0.00 \end{bmatrix}^T$$

(11)

## 3 主客观权重模糊模式识别模型应用

### 3.1 确定因素集

与边坡稳定性有关的因素很多，概括起来有地形、岩体、外在影响因素三大类，具体包括坡高、坡角、粘聚力、内摩擦角值、软层或结构面发育特征、风化程度、地下水情况、植被、降水等。作为示例，这里仅考虑坡高、边坡坡角、天然重度、土的内摩擦角、土的内聚力、地震烈度及孔隙水压力比 7 个主要影响因素。

### 3.2 建立边坡稳定性评定分级标准

根据大量边坡物理力学特性资料<sup>[8, 9]</sup>，将边坡稳定性评价分为 5 个级别<sup>[10]</sup>：(1)稳定；(2)较稳定；(3)一般；(4)不稳定；(5)极不稳定。如表 1 所示<sup>[12]</sup>。

### 3.3 实例

有 10 个边坡样本<sup>[11]</sup>，每一样本都有上述 7 个指标特征值表示样本的整体特征，组成了样本集的指标特征值矩阵  $X$ 。

由表 1 可得指标标准特征值矩阵  $Y$ 。其中：指标 1, 2, 6, 7 为越小越优型，指标 3~5 为越大越优型。对于第 1 类指标，取其 1 级指标区间的上界为 1 级指标标准特征值，5 级指标标准特征值取其指标区间的下界；对第 2 类指标，取其 1 级指标区间的下界为 1 级指标标准特征值，5 级指标标准特征值取其指标区间的上界；两类指标的中间各级指标标准特征值分别取各自指标区间的中值。

应用式(3)，(4)将指标标准特征值矩阵  $Y$  和样本集的指标特征值矩阵  $X$  转换为相应的相对隶属度矩阵  $S$ ， $R$  分别为

$$Y = \begin{bmatrix} 6.00 & 9.00 & 15.00 & 21.00 & 24.00 \\ 15.00 & 20.00 & 30.00 & 40.00 & 45.00 \\ 18.00 & 17.50 & 16.50 & 15.50 & 15.00 \\ 35.00 & 32.50 & 27.50 & 22.50 & 20.00 \\ 50.00 & 45.00 & 35.00 & 25.00 & 20.00 \\ 3.00 & 4.00 & 6.00 & 7.50 & 8.00 \\ 0.10 & 0.15 & 0.25 & 0.35 & 0.40 \end{bmatrix} \quad (12)$$

表 1 边坡稳定性评价分级标准

Table 1 Grades of slope stability evaluation

评定级别	坡高/m	边坡坡角/(°)	容重/(kN · m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	地震烈度	孔隙水压力比
稳定	<6	<15	>18	>35	>50	<3	<0.1
较稳定	6~12	15~25	17~18	30~35	40~50	3~5	0.1~0.2
一般	12~18	25~35	16~17	25~30	30~40	5~7	0.2~0.3
不稳定	18~24	35~45	15~16	20~25	20~30	7~8	0.3~0.4
极不稳定	>24	>45	<15	<20	<20	>8	>0.4

$$S = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.833 & 3 & 0.500 & 0 & 0.166 & 7 & 0.000 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.833 & 3 & 0.500 & 0 & 0.166 & 7 & 0.000 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.833 & 3 & 0.500 & 0 & 0.166 & 7 & 0.000 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.833 & 3 & 0.500 & 0 & 0.166 & 7 & 0.000 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.833 & 3 & 0.500 & 0 & 0.166 & 7 & 0.000 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.800 & 0 & 0.400 & 0 & 0.100 & 0 & 0.000 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.833 & 3 & 0.500 & 0 & 0.166 & 7 & 0.000 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.530 & 1.000 & 0.000 & 0.930 & 1.000 & 1.000 \\ 0.000 & 0.483 & 0.833 & 0.333 & 1.000 & 0.000 & 0.500 \\ 0.000 & 0.000 & 0.833 & 0.333 & 1.000 & 0.000 & 0.500 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.600 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.000 & 0.333 & 1.000 & 0.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.467 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.467 & 1.000 & 0.000 & 1.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.400 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.400 & 1.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

3.3.1 确定指标权向量

应用模糊模式识别交叉迭代模型式(8), (9)计算指标初始权向量, 为了简便可应用  $c = 2$  的交叉迭代模型。给定迭代精度  $\varepsilon = 0.000 1$ 。设指标权向量迭代初值:

$$w^0 = \{1/7, 1/7, 1/7, 1/7, 1/7, 1/7, 1/7\}$$

经过迭代得到满足迭代精度要求的指标初始权向量:

$$w^0 = \{0.020 5, 0.025 7, 0.160 4, 0.032 2, 0.147 6, 0.058 4, 0.555 3\} \quad (16)$$

下面按二元比较模糊决策分析简捷方法<sup>[7]</sup>对  $w^0$  进行调整。经过研究, 认为指标 6 的权重值偏小, 应对其进行调整。为此, 将权向量初值  $w^0$  除以其中的最大元素值 0.555 3, 得到非归一化权向量初值:

$$w^0 = \{0.036 9, 0.046 2, 0.288 9, 0.058 0, 0.265 8, 0.105 1, 1.000 0\} \quad (17)$$

研究认为, 最重要的指标 7 与需要调整权重的指标 6 相比, 处于同样或稍稍重要之间。应用语气算子与相对隶属度之间的关系表<sup>[7]</sup>, 可知同样或稍稍重要的相对隶属度为 0.905, 故将权向量  $w^0$  中指标 6 非归一化权重调整为 0.905, 经归一化可得调整后新的权向量为:

$$w = \{0.014 2, 0.017 8, 0.111 1, 0.022 3, 0.102 2, 0.348 0, 0.384 5\} \quad (18)$$

$w$  为交叉迭代与经验相结合确定的指标权向量。

3.3.2 计算样本集归属各级别的相对隶属度矩阵

将式(13), (14), (18)代入式(10)可得 10 个样本对 5 个级别的相对隶属度矩阵  $U$ :

$$U = \begin{bmatrix} 0.162 & 3 & 0.239 & 1 & 0.317 & 9 & 0.165 & 0 & 0.115 & 7 \\ 0.910 & 0 & 0.075 & 3 & 0.008 & 7 & 0.003 & 5 & 0.002 & 6 \\ 0.057 & 1 & 0.096 & 0 & 0.387 & 2 & 0.298 & 1 & 0.161 & 7 \\ 0.057 & 1 & 0.095 & 9 & 0.386 & 4 & 0.298 & 6 & 0.162 & 0 \\ 0.032 & 0 & 0.047 & 6 & 0.138 & 8 & 0.406 & 0 & 0.375 & 6 \\ 0.894 & 1 & 0.088 & 1 & 0.010 & 5 & 0.004 & 2 & 0.003 & 1 \\ 0.909 & 8 & 0.075 & 2 & 0.008 & 8 & 0.003 & 5 & 0.002 & 6 \\ 0.927 & 0 & 0.061 & 0 & 0.007 & 1 & 0.002 & 8 & 0.002 & 1 \\ 0.923 & 4 & 0.064 & 0 & 0.007 & 4 & 0.003 & 0 & 0.002 & 2 \\ 0.162 & 3 & 0.239 & 0 & 0.317 & 9 & 0.165 & 0 & 0.115 & 8 \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

3.3.3 计算级别特征向量<sup>[7]</sup>

在模糊集合论中一般采用最大隶属原则对样本的归属进行判别, 但有时会出现误判, 采用级别特征值判别可以较好地解决这个问题, 且  $H$  为

$$H = \{1, 2, 3, 4, 5\} \cdot \{u_{hj}\} = \{1.113, 3.411, 3.413, 4.046, 1.134, 1.114, 1.092, 2.833, 1.097, 2.833\} \quad (20)$$

表 2 判断结果

Table 2 Judgement results

样本	H	判别	安全系数
1	1.113	稳定	1.510
2	3.411	较不稳定	0.990
3	3.413	较不稳定	1.210
4	4.046	不稳定	0.960
5	1.134	稳定	1.290
6	1.114	稳定	1.160
7	1.092	稳定	1.420
8	2.833	一般	1.240
9	1.097	稳定	1.360
10	2.833	一般	1.190

从计算结果来看, 10 个样本按级别特征值从小到大排序为: 7, 9, 1, 6, 5, 8, 10, 2, 3, 4。其中样本 7, 9, 1, 6, 5 属于一级, 判断结果为稳定; 8, 10 接近三级, 判断结果为一般; 2, 3 样本处于三级和四级之间, 判断结果为较不稳定; 样本 4 属于四级, 判断结果为不稳定。以上稳定性评判结果

与安全系数加以比较, 两者的评判结果基本吻合, 说明边坡稳定性主客观权重多级模糊模式识别分析模型是可靠和实用的。个别样本, 如样本 6 出现出入则是因为多级模糊模式识别考虑的因素更加全面, 考虑到了边坡稳定性的不确定性, 因而认为多级模糊模式识别的评判结果更具科学性和合理性。

### 参考文献(References):

- [1] 沈良峰, 顾苏林. 边坡稳定性分析的模糊综合评判法[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2001, 17(4): 111 - 113.(Shen Liangfeng, Gu Sulin. Fuzzy comprehensive evaluation for the slope stability analysis[J]. Journal of Harbin University of Commerce(Natural Sciences), 2001, 17(4): 111 - 113.(in Chinese))
- [2] 王秀丽, 王艳红. 黄土边坡稳定性的多级模糊模式识别分析[J]. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(3): 85 - 88.(Wang Xiuli, Wang Yanhong. Analysis of loess slope stability with multi-pole fuzzy pattern recognition mode[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2001, 27(3): 85 - 88.(in Chinese))
- [3] 许传华, 朱绳武, 房定旺. 边坡稳定性的 ISODATA 模糊聚类分析[J]. 金属矿山, 2000, (12): 24 - 26.(Xu Chuanhua, Zhu Shengwu, Fang Dingwang. ISODATA fuzzy clustering analysis of slope stability[J]. Metal Mine, 2000, (12): 24 - 26.(in Chinese))
- [4] 徐卫亚, 蒋中明, 石安池. 基于模糊集理论的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 409 - 413.(Xu Weiya, Jiang Zhongming, Shi Anchi. Slope stability analysis using fuzzy sets theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 409 - 413.(in Chinese))
- [5] 夏元友, 朱瑞赓. 岩质边坡稳定性多人多层次模糊综合评价系统研究[J]. 工程地质学报, 1999, 7(1): 46 - 53.(Xia Yuanyou, Zhu Ruigeng. A system for multiperson and multiplayer fuzzy comprehensive evaluation of rock slope stability[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(1): 46 - 53.(in Chinese))
- [6] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 吉林: 吉林大学出版社, 2002.(Chen Shouyu. Theory and Application of the Fuzzy Identify of the System Optimal Selection for the Complex Water Resource[M]. Jilin: Jilin University Press, 2002.(in Chinese))
- [7] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.(Chen Shouyu. Theory and Application of the Fuzzy Sets for Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.(in Chinese))
- [8] 王永焱, 林在贵. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990.(Wang Yongyan, Lin Zaigui. Structural Characters and Physical and Mechanical Properties of Chinese Loess[M]. Beijing: Science Press, 1990.(in Chinese))
- [9] 文宝萍, 李媛, 王兴林, 等. 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究[M]. 北京: 地质出版社, 1997.(Wen Baoping, Li Yuan, Wang Xinglin, et al. Research on Failure Forecast of Typical Loess Slopes and Disaster Reduction Countermeasures[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.(in Chinese))
- [10] 王元汉, 刘端伶. 边坡稳定的 Fuzzy 综合评判法[J]. 华中理工大学学报, 1998, 5(1): 96 - 98.(Wang Yuanhan, Liu Duanlin. Comprehensive fuzzy evaluation method for the stability of slope[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1998, 5(1): 96 - 98.(in Chinese))
- [11] 李靖, 周欣华, 党进谦. 黄土边坡稳定性图解法[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 40 - 43.(Li Jing, Zhou Xinhua, Dang Jinqian. Graphical method for the stability of loess slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 40 - 43.(in Chinese))