

基于改进型拉开档次法的滑坡治理方案优选

雷晓锋, 杨少文, 王 磊

(西安公路研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 滑坡是工程建设中常见的地质灾害, 安全又经济的治理方案可以降低滑坡发生的概率, 减轻对工程建设的影响, 如何从系统工程的角度对方案进行排序是近年来的研究热点. 以延安某滑坡的治理工程为例, 在初步设计阶段提出的四种滑坡治理方案的基础上, 结合同类工程经验, 构建了滑坡方案优选的层次模型; 并采用特征值法求出各评价指标的主客观权重系数, 对评价指标进行“权化处理”; 再采用拉开档次法对权化处理后的数据进行客观赋权, 突出各评价对象间的整体差异; 最后采用加权集结模型对各滑坡治理方案进行综合评价, 确定出最优方案. 同时引入风险态度因子的概念, 分析了不同风险态度因子对方案排序的影响, 研究了滑坡治理方案排序结果对风险态度因子的敏感性. 结果表明: 当风险态度因子 $\epsilon \in [-0.5, -0.2]$ 时, 决策者倾向于接受风险, 方案四的综合属性效用值明显高于其他三个方案, 方案四为优选方案; 当风险态度因子 $\epsilon \in [-0.1, 0.5]$ 时, 决策者倾向于规避风险, 方案一的综合属性效用值最大, 方案一为最佳方案; 一般工程治理时决策者所持的风险态度均为规避风险, 所以推荐方案 1 作为该滑坡治理的首选方案. 该方法弥补了单独使用主观或者客观赋权法的不足, 使评价结果更为准确, 为该类型方案优选设计提供了有效的思路及参考.

关键词: 滑坡方案优选; 特征值法; 拉开档次法; 风险态度因子

中图分类号: TU 457; P 642

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0213-09

Optimization of landslide control scheme based on improved scatter-degree approach

LEI Xiaofeng, YANG Shaowen, WANG Lei

(Xi'an Highway Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Landslide is a common geological hazard in engineering construction. Safe and economical treatment schemes can lower the occurrence probability of landslides and reduce the impact on engineering construction. How to rank the schemes from the perspective of system engineering is a research hotspot in recent years. Taking the landslide control project in Yan'an as an example, on the basis of four landslide control schemes proposed in the preliminary design stage and in combination with the experience of similar projects, an optimized hierarchical model for landslide schemes is constructed. The subjective weight coefficients of each evaluation index are obtained with eigenvalue method, and the evaluation indexes are “weighted”. The weighted data are empowered objectively with scatter-degree approach to highlight the overall differences among the evaluation objects. Finally, the weighted aggregate model is adopted to evaluate the landslide control schemes comprehensively and determine the optimal scheme. At the same time, the concept of risk attitude factor is introduced to analyze the impact of different risk attitude factors on the scheme sequencing and to research the sensitivity of the sequencing results to risk attitude factors in landslide control schemes. Results show that when the risk attitude factor is $\epsilon \in [-0.5, -0.2]$, decision makers tend to accept the risks, and the comprehensive attribute utility value of scheme 4 is significantly higher than that of the other three schemes, and scheme 4 is an optimal scheme. When the risk attitude factor is $\epsilon \in [-0.1, 0.5]$, decision makers tend to avoid risks. Scheme 1 with the biggest comprehensive attribute utility value should be the optimal scheme. Generally, in engineering management, decision makers are to avoid the risk, so scheme 1 is recommended as the preferred scheme for the landslide control. This method compensates for the shortcomings in independent use of subjective or objective weighting method, makes the evaluation results more accurate, and provides an effective thought and reference for optimal design of such schemes.

Key words: Landslide scheme optimization; eigenvalue method; scatter degree method; risk attitude factor

滑坡是公路、铁路、水利等工程建设中常见的地质灾害,安全、有效又经济的治理方案可以降低滑坡发生的概率,减轻对工程建设的影响。而工程方案优选是一项综合考虑技术、风险、经济、环境的复杂工程^[1],如何从系统工程的角度对方案进行排序是近年来的热点问题。目前的研究成果多见于模糊数学^[2-5]、BP 神经网络^[6]、灰色理论^[7-8]、集对分析^[9]等数学模型,但专门针对滑坡方案优选的研究很少,仅见文献^[10-14]。

文献^[10]在综合考虑经济、技术、环境各方面影响因素的基础上,构造了不稳定边坡治理方案的层次分析模型,应用专家依次评判和共同评判两种方式进行多层次模糊综合群决策,对不稳定边坡的治理方案进行优劣排序;但模型指标的权重都是基于专家经验给出的主观值,没有对方案之间的客观差距进行评价。文献^[11]采用熵权——理想点决策法对滑坡四个治理方案进行优选排序,但分析模型仅考虑了安全、环境、经济、技术、施工等六个一级因素,且在决策过程中未考虑决策者的风险态度影响。文献^[12-14]综合考虑了多方面的影响因素,采用多属性决策基本理论建立了基于上升有序加权欧氏平均(AOWEA)算子的滑坡治理方案优选模型,并在评价过程中引入了决策者风险态度因子;但对各指标的赋权采用的是离差最大化原理,没有综合考虑决策人的主观经验。

本文以延安某滑坡的治理方案优选为例,建立了滑坡防治方案优选层次模型,采用特征值法对各层次指标进行主观赋权,对评价指标进行权化处理,再利用拉开档次法求取各指标客观权重;最后采用加权集结法^[15-16]对各方案进行优选排序;同时研究了风险态度因子 ϵ 对方案排序的影响。

1 滑坡治理方案简介

工程滑坡位于陕西省延安市延河及其支流蟠龙河交汇处的西北部黄土梁峁的斜坡地带,地形总体由西向东倾斜,地形起伏较大。滑坡体上次级陡坎发育,北侧较缓,南侧较陡,总体坡度为 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$,体积约 $611.6\times 104\text{m}^3$,属于大型土质堆积层滑坡。据相关资料统计,延安地区自 2005 年起雨季降水明显增多,岩土体力学性质弱化,抗滑能力降低。现场勘查测绘表明,工程滑坡范围内存在人为建房、挖窑,坡地耕种、坡脚开挖建厂等强烈的人类活动;加上坡脚处厂区及道路的修建等,坡体前缘受到扰动,滑坡稳定性降低。

滑坡全景卫星影像图如图 1 所示。



图 1 滑坡全景卫星影像图

Fig. 1 Landslide panoramic satellite striograph

经专家多次分析对比论证,本着“安全、环保、经济、协调”的原则,提出了四种治理方案。方案一:工程中北区开挖坡脚,设置一排锚固深度大于 10m ,桩间距 6m ,截面尺寸 $1.5\text{m}\times 2\text{m}$ 的抗滑桩;南区设置一排截面尺寸 $3\text{m}\times 4\text{m}$,桩间距 6m 的锚索抗滑桩;桩间板墙均设置有仰斜排水孔和泄水孔,用来排出坡体内部的水。方案二:工程中北区采用分级放坡的重力式挡墙与锚杆格构联合支挡;南区设置一排锚固深度大于 10m ,间距为 6.0m 、截面尺寸为 $3.0\text{m}\times 4.0\text{m}$ 的抗滑桩进行抗滑;挡墙及桩间用板墙上布设仰斜排水孔和泄水孔对坡体内部进行排水,抗滑桩以上坡体进行分级放坡。方案三:南区设置双排横向嵌岩深度大于 10m ,间距 6.0m 、截面尺寸为 $2.0\text{m}\times 3.0\text{m}$ 的抗滑桩予以抗滑;其它治理工程同方案二。方案四:南区采用坡体中上部多级削方卸载,部分抗滑桩、部分锚索抗滑桩联合支挡抗滑;其它治理工程同方案二。

2 改进型拉开档次法

拉开档次法从整体上客观地表达了各评价对象之间的差异,它默认各评价指标相对于评价目标的重要程度都相同。可实际上,在同一个评价体系中,不同的评价指标对于评价目标的重要程度一般是不相等的。因此,必须对拉开档次法进行改进,尽可能消除这种影响。

本文首先采用特征值法求出各评价指标的主观权重系数,对评价指标进行“权化处理”;再采用拉开档次法对权化处理后的数据进行客观赋权,突出各评价对象间的整体差异。这样弥补了单独使用主观或者客观赋权法的不足,使评价结果更为准确。

拉开档次法客观赋权的原理及步骤如下:

(1)设极大型评价指标 x_1, x_2, \dots, x_m 的综合评

价函数为

$$y = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \cdots + \omega_m x_m = \omega^T X \quad (1)$$

其中: $\omega = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_m)^T$ 是 m 维待定向量, $x = (x_1, x_2, \cdots, x_m)$ 为被评价对象的状态向量。

(2) 如将第 i 个评价对象 S_i 的 m 个标准观测值 $x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im}$ 带入上式中, 可得到:

$$y_i = \omega_1 x_{i1} + \omega_2 x_{i2} + \cdots + \omega_m x_{im}, \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (2)$$

记

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}$$

则式(2)可写成:

$$y = A\omega \quad (3)$$

(3) 变量 $y = \omega^T X$ 按 n 个评价对象取值构成的样本方差为

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{y^T y}{n} - \bar{y}^2 \quad (4)$$

将 $y = \omega^T X$ 代入式子(4)中, 并对原始数据进行规范化处理, 可知 $\bar{y} = 0$, 于是有

$$ns^2 = \omega^T A^T A \omega = \omega^T H \omega \quad (5)$$

式中, $H = A^T A$ 为实对称矩阵。

若对 ω 不加限制, 则式(5)可取任意大值。因此对 ω 作出以下限定

$$\begin{cases} \max \omega^T H \omega \\ s. t. \quad \omega^T \omega = 1 \\ \omega > 0 \end{cases} \quad (6)$$

也就是说, 式(6)取最大值时, H 的最大特征值所对应的标准特征向量即为权重向量 ω 。

(4) 求出权重向量 ω 后, 利用式(7)可求出各评价对象的综合属性效用值 y_i , 再根据 y_i 的大小对各评价对象进行排序, 得出评价结果。

$$y_i = \sum \omega_i x_{ij} (i = 1, 2, \cdots, m) \quad (7)$$

3 评价模型及决策矩阵的建立

3.1 滑坡方案优选评价模型

在1中工程实例的基础上, 结合以往的工程经验, 建立滑坡方案优选的评价模型, 如图2所示。准则层四个指标: U1 经济性指标、U2 技术性指标、U3 环境影响指标和 U4 风险性指标; 指标层共有10个指标: U11 建设成本, U12 检测费, U21 工程建设期, U22 施工技术难度, U23 治理效果, U31 施工对环境的影响, U32 结构与环境

的协调性, U33 施工产生次生灾害的可能性, U41 施工作业安全性引起的风险, U42 技术方案可行性引起的风险。

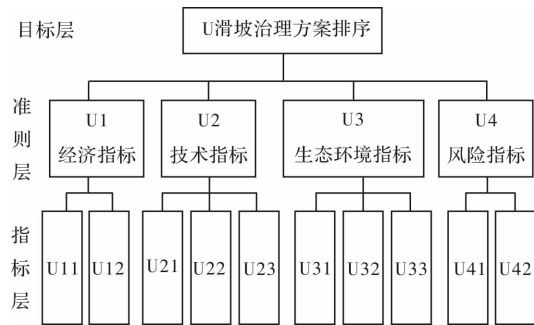


图2 滑坡治理方案评价模型

Fig. 2 Evaluation model of landslide control scheme

3.2 决策矩阵

(1) 决策矩阵的建立

邀请参与该滑坡治理设计、预算和施工等过程的五位专家, 对四种方案的各个指标评估比较、赋值打分。在所有评价指标中, 建设成本、检测费和工程建设期这三个指标根据工程预算给出, 为定量指标。而施工技术难度、风险性、治理效果等指标则是定性指标, 具有模糊性和不确定性, 不能直接用数据表达出来, 必须利用模糊语言转换规则, 将不同等级的属性指标转换为具体数字, 将定性指标规范化。本文采用的是目前常用的5级模糊语言转换规则, 将模糊语言转换成确定型数字; 模糊语言描述的5个等级: “好”、“较好”、“一般”、“较差”、“差”, 对应的归一化模糊数如表1所示。

表1 模糊语言归一化表

Tab. 1 Fuzzy language normalization table

等级	属性语意	归一化模糊数
I	好	[0.75, 1.00]
II	较好	[0.5, 0.75]
III	一般	[0.25, 0.5]
IV	较差	[0.00, 0.25]
V	差	[0.00, 0.00]

因为滑坡治理的不确定性、复杂性以及不同评判专家主观意识的不同, 指标属性的赋值并不是一个具体的数值, 而是一个区间数; 表2即为专家给出的最终决策矩阵。

表 2 各属性决策矩阵值

Tab. 2 Decision matrix value of different attributes

方案	U11	U12	U21	U22	U23	U31	U32	U33	U41	U42
1	[6 700, 7 000]	[110, 120]	[1.50, 2.10]	[0.20, 0.25]	[0.90, 0.95]	[0.10, 0.20]	[0.85, 0.90]	[0.10, 0.20]	[0.11, 0.21]	[0.06, 0.16]
2	[5 900, 6 200]	[105, 115]	[1.20, 1.80]	[0.23, 0.28]	[0.85, 0.90]	[0.12, 0.22]	[0.80, 0.85]	[0.13, 0.23]	[0.10, 0.20]	[0.10, 0.20]
3	[6 000, 6 300]	[110, 120]	[1.30, 1.90]	[0.24, 0.29]	[0.86, 0.91]	[0.14, 0.24]	[0.79, 0.84]	[0.14, 0.24]	[0.12, 0.22]	[0.13, 0.23]
4	[5 700, 6 000]	[100, 110]	[1.00, 1.60]	[0.18, 0.23]	[0.86, 0.92]	[0.15, 0.25]	[0.75, 0.80]	[0.15, 0.25]	[0.15, 0.25]	[0.14, 0.24]

表 3 各属性规范化决策矩阵

Tab. 3 Normalized decision matrix of attributes

方案	U11	U12	U21	U22	U23	U31	U32	U33	U41	U42
1	[0.216 2, 0.237 1]	[0.221 0, 0.263 9]	[0.145 7, 0.305 4]	[0.209 8, 0.325 4]	[0.244 6, 0.273 8]	[0.155 6, 0.564 6]	[0.250 7, 0.282 1]	[0.158 7, 0.571 0]	[0.139 7, 0.496 6]	[0.150 6, 0.843 3]
2	[0.244 1, 0.269 2]	[0.230 6, 0.276 4]	[0.169 9, 0.381 7]	[0.187 3, 0.282 9]	[0.231 0, 0.259 4]	[0.141 4, 0.470 5]	[0.236 0, 0.266 5]	[0.138 0, 0.439 2]	[0.146 7, 0.546 2]	[0.120 5, 0.506 0]
3	[0.240 2, 0.264 7]	[0.221 0, 0.273 9]	[0.161 0, 0.352 4]	[0.180 8, 0.271 1]	[0.233 7, 0.262 2]	[0.129 6, 0.403 3]	[0.233 0, 0.263 3]	[0.132 3, 0.407 8]	[0.133 3, 0.455 2]	[0.104 8, 0.389 2]
4	[0.252 2, 0.277 5]	[0.241 1, 0.290 2]	[0.191 2, 0.458 1]	[0.228 0, 0.361 5]	[0.233 7, 0.265 1]	[0.124 4, 0.376 4]	[0.221 2, 0.250 8]	[0.127 0, 0.380 6]	[0.117 3, 0.364 2]	[0.100 4, 0.361 4]

(2) 决策矩阵的规范化

设 $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ 表示具有区间数形式的矩阵值, 其中 $x_{ij} = [x_{ij}^L, x_{ij}^U]$ 表示方案 $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的属性值, 规定 $x_{ij}^L > 0, x_{ij}^U > 0$, 其中 x_{ij}^L 表示区间下限, x_{ij}^U 表示区间上限. 为消除指标间由于不同量纲而存在的不可公度性, 需要对评价指标进行规范化.

效益型指标的规范化:

$$x_{ij}^L = \frac{x_{ij}^L}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^U}, x_{ij}^U = \frac{x_{ij}^U}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^L},$$

$$j \in I_1, i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

成本型指标的规范化:

$$x_{ij}^L = \frac{1/x_{ij}^U}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{x_{ij}^L}}, x_{ij}^U = \frac{1/x_{ij}^L}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{x_{ij}^U}},$$

$$j \in I_2, i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

其中: I_1 为效益型属性下标集合; I_2 为成本型属性下标集合; 规范化后的矩阵如表 3 所示.

4 特征值法求解主观权重

邀请参与该项目治理的 5 位专家, 采用特征值法的 1~9 标度(表 4)对评价指标进行对比、分析, 给出各评价因子相对于自身准则层的判断矩阵,

如表 6~表 10 所示.

表 4 1~9 标度评分法

Tab. 4 1~9 Scale scoring method

标度	指标 i 与 j 重要性比较
1	同样重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	强烈重要
9	极端重要
2, 4, 6, 8	上述相邻比较中间值

各指标权重采用乘积法计算, 乘积法的步骤如下:

① 计算矩阵每一行元素的乘积 M_i .

$$M_i = \prod_{j=1}^n b_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

② 计算 M_i 的 n 次方根 \bar{W}_i .

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (11)$$

③ 将向量 \bar{W} 归一化

$$W_i = \bar{W}_i / \sum_{i=1}^n W_i \quad (12)$$

④ 计算最大特征根 λ_{max}

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{[OC][W]_i}{n \cdot W_i} \quad (13)$$

⑤进行一致性检验；

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$$
 (14)

式中， n 为判断矩阵阶数

⑥查随机性指标 RI(表 5)，并计算比值 CI/RI ，当 $CI/RI<0.1$ 时，可认为判断矩阵达到了要求。否则，需要重新进行判断矩阵赋值。

各指标层相对准则层及准则层相对目标层的权重计算结果见表 6~表 10；各指标层相对目标层的权重计算结果见表 11。

所以，基于特征值法的各指标主观权重为

$$\begin{aligned} \omega &= [\omega_{U11}, \omega_{U12}, \omega_{U21}, \omega_{U22}, \omega_{U23}, \\ &\quad \omega_{U31}, \omega_{U32}, \omega_{U33}, \omega_{U41}, \omega_{U42}] \\ &= [0.061, 0.043, 0.179, 0.118, 0.057, \\ &\quad 0.174, 0.071, 0.187, 0.064, 0.046] \end{aligned}$$

表 5 随机性指标 RI 的取值

Tab. 5 The value of the random index RI

n	1	2	3	4	5	6
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24
n	7	8	9	10	11	12
RI	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54

表 6 目标层 U-准则层 U_i 判断矩阵

Tab. 6 Judgment matrix of target level U-Criterion level U_i

U	U1	U2	U3	U4	ω
U1	1	1/3	1/5	1	0.104
U2	3	1	1	4	0.354
U3	5	1	1	5	0.432
U4	1	1/4	1/5	1	0.110
一致性检验： $\lambda_{\max}=4.050$ $CR=0.018<0.1$					

表 7 准则层 U1-指标层 $U1_j$ 判断矩阵

Tab. 7 Judgment matrix of criterion level U1-Index level $U1_j$

U1	U11	U12	ω
U11	1	3	0.586
U12	1/3	1	0.414
一致性检验： $\lambda_{\max}=2$ $CR=0<0.1$			

表 8 准则层 U2-指标层 $U2_j$ 判断矩阵

Tab. 8 Judgment matrix of criterion level U2-Index level $U2_j$

U2	U21	U22	U23	ω
U21	1	1/2	3	0.333
U22	2	1	4	0.506
U23	1/3	1/4	1	0.162
一致性检验： $\lambda_{\max}=3.094$ $CR=0.091<0.1$				

表 9 准则层 U3-指标层 $U3_j$ 判断矩阵

Tab. 9 Judgment matrix of criterion level U3-Index level $U3_j$

U3	U31	U32	U33	ω
U31	1	3	1	0.403
U32	1/3	1	1/4	0.164
U33	1	4	1	0.433
一致性检验： $\lambda_{\max}=3.07$ $CR=0.077<0.1$				

表 10 准则层 U4-指标层 $U4_j$ 判断矩阵

Tab. 10 Judgment matrix of criterion level U4-Index level $U4_j$

U4	U41	U42	ω
U41	1	3	0.586
U42	1/3	1	0.414
一致性检验： $\lambda_{\max}=2$ $CR=0<0.1$			

表 11 各指标层相对权重赋值

Tab. 11 Relative weight assignment of index level

准则层	准则层权重	评价层	评价层权重	相对目标层权重
U1 经济指标	0.104	U11 建设成本	0.568	0.061
		U12 检测费	0.414	0.043
U2 技术指标	0.354	U21 工程建设期	0.333	0.179
		U22 施工技术难度	0.506	0.118
		U23 治理效果	0.162	0.057
U3 环境生态指标	0.432	U31 施工对环境的影响	0.403	0.174
		U32 结构与环境的协调性	0.164	0.071
		U33 施工产生次生灾害的可能性	0.433	0.187
U4 风险指标	0.110	U41 施工作业安全性引起的风险	0.568	0.064
		U42 技术方案可行性引起的风险	0.414	0.046

5 改进型拉开档次法综合决策

5.1 风险态度因子

为了更全面的分析和评价目标体系,引入风险态度因子的概念.

取闭区间 $D = [d_1, d_2]$, d_1, d_2 均为实数,分别称 $e(D) = d_2 - d_1$ 为 D 的区间宽度, $n(D) = (d_1 + d_2)/2$ 为 D 的区间中点. 映射函数 $\varphi_\epsilon(D) = n(D) + \epsilon e(D)$, 其中 ϵ 代表风险态度因子.

对待同一个决策问题,不同专家可能持不同态度,一般分为三种:接受风险、对持中立风险或规避风险^[17].

$$\begin{cases} -0.5 \leq \epsilon < 0, & \text{风险接受型} \\ 0, & \text{风险中立型} \\ 0 < \epsilon \leq 0.5, & \text{风险规避型} \end{cases} \quad (15)$$

将已规范化的区间决策矩阵转化为包含风险态度因子的决策矩阵,如表 12 所示.

表 12 计入风险态度因子的决策矩阵

Tab. 12 Decision matrix included into risk attitude factor

方案	U11	U12	U21	U22	U23	U31	U32	U33	U41	U42
1	0.226 6+ 0.020 9 ϵ	0.242 4+ 0.042 9 ϵ	0.225 5+ 0.159 7 ϵ	0.267 6+ 0.115 6 ϵ	0.259 2+ 0.029 2 ϵ	0.360 1+ 0.409 0 ϵ	0.266 4+ 0.031 4 ϵ	0.364 8+ 0.412 2 ϵ	0.318 1+ 0.356 9 ϵ	0.496 9+ 0.692 7 ϵ
2	0.255 6+ 0.025 2 ϵ	0.253 5+ 0.045 8 ϵ	0.275 8+ 0.211 8 ϵ	0.235 1+ 0.095 6 ϵ	0.245 2+ 0.028 4 ϵ	0.306 0+ 0.329 1 ϵ	0.251 2+ 0.030 5 ϵ	0.288 6+ 0.301 2 ϵ	0.346 4+ 0.399 6 ϵ	0.313 2+ 0.385 5 ϵ
3	0.252 5+ 0.024 6 ϵ	0.242 4+ 0.042 9 ϵ	0.256 7+ 0.191 4 ϵ	0.226 0+ 0.090 3 ϵ	0.248 0+ 0.028 6 ϵ	0.266 5+ 0.273 6 ϵ	0.248 2+ 0.030 3 ϵ	0.270 0+ 0.275 6 ϵ	0.294 3+ 0.321 9 ϵ	0.247 0+ 0.284 4 ϵ
4	0.265 4+ 0.026 5 ϵ	0.265 7+ 0.049 1 ϵ	0.324 6+ 0.266 9 ϵ	0.294 8+ 0.133 5 ϵ	0.249 4+ 0.031 4 ϵ	0.250 4+ 0.251 9 ϵ	0.236 0+ 0.029 5 ϵ	0.253 8+ 0.253 7 ϵ	0.240 7+ 0.246 8 ϵ	0.230 9+ 0.261 0 ϵ

5.2 风险中立型专家的决策

取 $\epsilon = 0$, 以风险中立型专家的决策评价为例,进行方案优选.

(1) 风险中立型专家, $\epsilon = 0$, 由表 12 可得其决策矩阵 U_{ij}^ϵ :

$$U^{\epsilon=0} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.226\ 6 & 0.242\ 4 & 0.225\ 5 & 0.267\ 6 & 0.259\ 2 \\ 0.255\ 6 & 0.253\ 5 & 0.275\ 8 & 0.235\ 1 & 0.245\ 2 \\ 0.252\ 5 & 0.242\ 4 & 0.256\ 7 & 0.226\ 0 & 0.248\ 0 \\ 0.265\ 4 & 0.265\ 7 & 0.324\ 6 & 0.294\ 8 & 0.249\ 4 \\ 0.360\ 1 & 0.266\ 4 & 0.364\ 8 & 0.318\ 1 & 0.496\ 9 \\ 0.306\ 0 & 0.251\ 2 & 0.288\ 6 & 0.346\ 4 & 0.313\ 2 \\ 0.266\ 5 & 0.248\ 2 & 0.270\ 0 & 0.294\ 3 & 0.247\ 0 \\ 0.250\ 4 & 0.236\ 0 & 0.253\ 8 & 0.240\ 7 & 0.230\ 9 \end{bmatrix}$$

(2) 基于特征值法的各属性决策矩阵各指标权重计算结果如下.

$$\begin{aligned} \omega &= [\omega_{U11}, \omega_{U12}, \omega_{U21}, \omega_{U22}, \omega_{U23}, \\ &\quad \omega_{U31}, \omega_{U32}, \omega_{U33}, \omega_{U41}, \omega_{U42}] \\ &= [0.061, 0.043, 0.179, 0.118, 0.057, \\ &\quad 0.174, 0.071, 0.187, 0.064, 0.046] \end{aligned}$$

(3) 主观加权规范化后的决策矩阵 $A^\epsilon = [a_{ij}^\epsilon]_{m \times n}$, 其中

$$A_{ij}^\epsilon = U_{ij}^\epsilon W_j$$

$$a_{ij}^\epsilon = u_{ij}^\epsilon \omega_j, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

所以, $A^{\epsilon=0} =$

$$\begin{bmatrix} 0.013\ 8 & 0.010\ 4 & 0.040\ 4 & 0.031\ 6 & 0.014\ 8 \\ 0.015\ 7 & 0.010\ 9 & 0.049\ 4 & 0.027\ 7 & 0.014\ 0 \\ 0.015\ 4 & 0.010\ 4 & 0.045\ 9 & 0.026\ 7 & 0.014\ 1 \\ 0.016\ 2 & 0.014\ 4 & 0.058\ 1 & 0.034\ 8 & 0.014\ 2 \\ 0.062\ 7 & 0.018\ 9 & 0.068\ 2 & 0.020\ 4 & 0.022\ 9 \\ 0.053\ 2 & 0.017\ 8 & 0.054\ 0 & 0.022\ 2 & 0.014\ 4 \\ 0.046\ 4 & 0.017\ 6 & 0.050\ 5 & 0.018\ 8 & 0.014\ 4 \\ 0.043\ 6 & 0.016\ 8 & 0.047\ 5 & 0.015\ 4 & 0.010\ 6 \end{bmatrix}$$

归一化处理后, $A^{\epsilon=0} =$

$$\begin{bmatrix} 0.049\ 2 & 0.037\ 1 & 0.143\ 6 & 0.112\ 3 & 0.052\ 6 \\ 0.056\ 1 & 0.039\ 0 & 0.176\ 8 & 0.099\ 3 & 0.050\ 0 \\ 0.059\ 9 & 0.040\ 5 & 0.178\ 6 & 0.103\ 7 & 0.054\ 9 \\ 0.060\ 3 & 0.042\ 5 & 0.216\ 4 & 0.129\ 5 & 0.052\ 9 \\ 0.222\ 9 & 0.067\ 3 & 0.242\ 7 & 0.072\ 4 & 0.081\ 3 \\ 0.190\ 6 & 0.063\ 9 & 0.193\ 3 & 0.079\ 4 & 0.051\ 6 \\ 0.180\ 2 & 0.068\ 5 & 0.196\ 3 & 0.073\ 2 & 0.044\ 2 \\ 0.162\ 3 & 0.062\ 4 & 0.176\ 7 & 0.057\ 4 & 0.039\ 6 \end{bmatrix}$$

(4) 求得 $A^{\epsilon=0}$ 的对称矩阵 H 为

$$H = \begin{bmatrix} 0.013 & 0.009 & 0.041 & 0.025 & 0.012 \\ 0.009 & 0.006 & 0.029 & 0.018 & 0.008 \\ 0.041 & 0.029 & 0.131 & 0.080 & 0.038 \\ 0.025 & 0.018 & 0.080 & 0.050 & 0.023 \\ 0.012 & 0.008 & 0.038 & 0.023 & 0.011 \\ 0.042 & 0.030 & 0.133 & 0.084 & 0.040 \\ 0.015 & 0.010 & 0.047 & 0.029 & 0.014 \\ 0.045 & 0.032 & 0.142 & 0.090 & 0.043 \\ 0.016 & 0.011 & 0.050 & 0.031 & 0.015 \\ 0.012 & 0.009 & 0.037 & 0.024 & 0.011 \\ 0.042 & 0.015 & 0.045 & 0.016 & 0.012 \\ 0.030 & 0.010 & 0.032 & 0.011 & 0.009 \\ 0.133 & 0.047 & 0.142 & 0.050 & 0.037 \\ 0.084 & 0.029 & 0.090 & 0.031 & 0.024 \\ 0.040 & 0.014 & 0.043 & 0.015 & 0.011 \\ 0.145 & 0.050 & 0.155 & 0.054 & 0.042 \\ 0.050 & 0.017 & 0.053 & 0.019 & 0.014 \\ 0.155 & 0.053 & 0.166 & 0.057 & 0.045 \\ 0.054 & 0.019 & 0.057 & 0.020 & 0.015 \\ 0.042 & 0.014 & 0.045 & 0.015 & 0.013 \end{bmatrix}$$

(5)采用 MATLAB 求解 $H = A^T A$ 最大特征值对应的最大特征向量即为拉开档次法所得权重, 即
 $\omega = (0.150, 0.106, 0.474, 0.296, 0.140, 0.505, 0.175, 0.541, 0.188, 0.146)$
归一化处理
后
 $\omega = (0.055, 0.039, 0.174, 0.109, 0.051, 0.186, 0.064, 0.199, 0.069, 0.054)$

(6)根据线性加权法的集结模型式(7)计算各方案的综合效用值, 可得方案一、二、三、四的综合效用值分别为 3.710、3.671、3.656、3.668.

各方案的优选排序结果为: $y_1 > y_4 > y_2 > y_3$, 方案一的综合效用值最大, 因此方案一为最佳滑坡治理方案.

6 不同风险态度下的滑坡治理方案综合效用值排序

为分析不同风险态度因子对方案选型的影响, 以 0.1 为步长, 给出了不同风险态度因子下各方案的综合效用值及其排序, 如表 13 所示.

分析可知, 风险态度 ϵ 从 -0.5 增加到 $+0.5$, 决策者的风险态度从接受风险型调整为规避风险型, 各方案的综合属性效用值及其排序也在发生改变.

当风险态度因子 $\epsilon \in [-0.5, -0.2]$ 时, 决策者倾向于接受风险, 方案四的综合属性效用值明显高于其他三个方案, 方案四为优选方案; 风险态度因子在 $-0.5 \rightarrow -0.4$ 之间时, $y_3 > y_1$, 风险态度因子在 $-0.3 \rightarrow -0.2$ 之间时, $y_1 > y_3$, 说明方案 3 和方案 1 的排序对对风险态度因子区间 $\epsilon \in [-0.5, -0.2]$ 比较敏感.

当风险态度因子 $\epsilon \in [-0.1, 0.5]$ 时, 方案一的综合属性效用值最大, 方案一为最佳方案; $\epsilon \in [-0.1, 0.2]$ 时, 方案 2 和方案 4 的排序发生了改变, 说明方案 2 和方案 4 的排序对风险态度因子区间 $\epsilon \in [-0.1, 0.2]$ 比较敏感; $\epsilon \in [0.3, 0.5]$ 时, 四个方案的排序为 $y_1 > y_2 > y_4 > y_3$, 方案 1 为优选方案.

综合考虑, 一般工程治理时决策者所持的风险态度均为规避风险, 所以推荐方案 1 作为该滑坡治理的首选方案.

表 13 不同风险态度因子 ϵ 下的综合效用值
Tab. 13 Comprehensive utility values under different risk attitude factors ϵ

ϵ	y_1^ϵ	y_2^ϵ	y_3^ϵ	y_4^ϵ	方案排序结果
-0.5	3.451 9	3.464 6	3.462 0	3.523 9	$y_4 > y_3 > y_2 > y_1$
-0.4	3.493 0	3.498 5	3.495 0	3.550 6	$y_4 > y_3 > y_2 > y_1$
-0.3	3.545 6	3.541 4	3.534 1	3.577 7	$y_4 > y_1 > y_2 > y_3$
-0.2	3.601 1	3.586 2	3.576 4	3.608 4	$y_4 > y_1 > y_2 > y_3$
-0.1	3.654 4	3.630 1	3.617 8	3.641 2	$y_1 > y_4 > y_2 > y_3$
0	3.710 1	3.671 0	3.656 4	3.672 7	$y_1 > y_4 > y_2 > y_3$
0.1	3.751 2	3.710 5	3.694 7	3.701 3	$y_1 > y_2 > y_4 > y_3$
0.2	3.792 0	3.745 1	3.729 2	3.729 7	$y_1 > y_2 > y_4 > y_3$
0.3	3.831 1	3.779 4	3.762 5	3.755 3	$y_1 > y_2 > y_3 > y_4$
0.4	3.867 2	3.809 7	3.792 1	3.780 8	$y_1 > y_2 > y_3 > y_4$
0.5	3.899 4	3.837 0	3.820 1	3.802 8	$y_1 > y_2 > y_3 > y_4$

7 结论

以延安某滑坡为例,在初设阶段提出的四种滑坡治理方案的基础上,采用改进型拉开档次法对各方案进行优选排序。

(1)从经济性、技术性、环境影响性和风险性四个方面分别建立其评价指标,构建了滑坡治理方案优选模型;并采用特征值法求解各个评价指标的主观权重。

(2)采用主观和客观相结合的方式进行赋权;采用主观赋权法的特征值法求得权重,对各评价指标进行“权化处理”,再采用客观赋权法的拉开档次法求出各评价指标的最终权重。

(3)评价过程中引入风险态度因子,分析了不同风险态度因子条件下,各个方案排序的差异。当风险态度因子 $\epsilon \in [-0.5, -0.2]$ 时,决策者倾向于接受风险,方案四的综合属性效用值明显高于其他三个方案,方案四为优选方案;当风险态度因子 $\epsilon \in [-0.1, 0.5]$ 时,决策者倾向于规避风险,方案一的综合属性效用值最大,方案一为最佳方案;一般工程治理时决策者所持的风险态度均为规避风险,所以推荐方案1作为该滑坡治理的首选方案。

参考文献 References

- [1] 王恭先. 滑坡防治方案的选择与优化[J]. 岩石力学与工程学报. 2006, 25(S2): 3867-3873.
WANG Gongxian. Choic and optimization of landslide control plan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006, 25(S2): 3867-3873.
- [2] 贾俊妮, 叶少有, 余振华. 城市桥梁设计方案的模糊综合评判[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 233-236.
JIA Junni, YE Shaoyou, YU ZhenHua. Fuzzy comprehensive evaluation applied in city bridge scheme design [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2008, 31(2): 233-236.
- [3] 王新民, 赵彬, 张钦礼. 基于层次分析和模糊数学的采矿方法选择[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(5): 875-880.
WANG Xinmin, ZHAO Bin, ZHANG Qinli. Mining method choice based on AHP and fuzzy mathematics [J]. J. Cent. South Univ. (Science and Technology), 2008, 39(5): 875-880.

- [4] 陈永贵, 邹银生, 张可能. 坝基防渗治理的多目标模糊决策方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(3): 15-18.
CHEN Yonggui, ZOU Yinsheng, ZHANG Keneng. Multi-objectives fuzzy decision-making method for dam foundation seepage control engineering [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(3): 15-18.
- [5] 李远富, 薛波, 邓域才. 铁路选线设计方案多目标决策模糊优选模型及其应用研究[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(5): 465-470.
LI Yuanfu, XUE Bo, DENG Yucai. A fuzzy optimal selection model and its application in multi-objective decision making of variant projects in railway loading [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35(5): 465-470.
- [6] 田成祥, 付成群, 吴海鹏, 等. 基于 GA-BP 网络的工程兵桥梁爆破方案评估模型[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(8): 229-232.
TIAN Chengxiang, FU Chengqun, WU Haipeng, et al. Application of GA-BP arithmetic in evaluation model of bridge blasting program[J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(8): 229-232.
- [7] 梅年峰, 罗学东, 蒋楠, 等. 基坑支护方案灰色多目标决策优选模型的建立与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(5): 1982-1987.
MEI Nianfeng, LUO Xuedong, JIANG Nan, et al. Establishment and application of grey multi-objective decision-making optimization model for foundation pit supporting schemes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(5): 1982-1987.
- [8] 曹文贵, 张永杰, 赵明华. 基坑支护方案确定的区间关联模糊优化方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 66-71.
CAO Wengui, ZHANG Yongjie, ZHAO Minghua. Study on interval relative fuzzy optimization method to determine support schemes for foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 66-71.
- [9] 张浩, 裴乐淼, 张树有. 基于集对分析的可重构机床模块配置设计方案评价方法及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(7): 1232-1241.
ZHANG Hao, QIU Lemiao, ZHANG Shuyou. Evalu-

- ation method based on set pair analysis for configuration scheme of reconfigurable machine tool[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(7): 1232-1241.
- [10] 谢全敏,夏元友. 边坡治理多层次多目标优化决策方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002(10): 21-24.
XIE Quanmin, XIA Yuanyou. Multihierarchy & multiobjective optimization decision methods of slope treatment schemes and its application[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002(10): 21-24.
- [11] 王念秦,姚勇,罗东海. 滑坡综合治理方案比选评价模型[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 111-114.
WANG Nianqin, YAO Yong, LUO Donghai. Comparison and choice of integrated control schemes for landslide[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(1): 111-114.
- [12] 李葛. 基于多属性决策的滑坡治理方案优选与监测分析研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
LI Ge. Study on optimization of landslide treatment plan based on multiple attribute decision making and landslide monitoring analysis [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [13] 李寻昌,叶君文,李葛,等. 基于风险态度因子的某滑坡治理方案优选研究[J]. 路基工程, 2018(5): 17-23.
LI Xunchang, YE Junwen, LI Ge, et al. Study on the optimal choice of landslide treatment based on risk attitude factor[J]. Subgrade Engineering, 2018(5): 17-23.
- [14] 李寻昌,叶君文,李葛. 基于 AOWEA 算子的滑坡治理方案优选[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(3): 27-33.
LI Xunchang, YE Junwen, LI Ge. Optimization of landslide treatment scheme based on AOWEA operator [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(3): 27-33.
- [15] WANG ZhouJing. A note on "A group decision making model based on a generalized ordered weighted geometric average operator with interval preference matrices" [J]. Science Direct, 2017(4): 1-9.
- [16] XU Z S, DA Q L. The ordered weighted geometric averaging operators [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2002, 17: 569-579.
- [17] SABATINO Samantha, FRANGOPOL Dan M, DONG You. Sustainability-informed maintenance optimization of highway bridges considering multi-attribute utility and risk attitude [J]. Engineering Structures, 2015, (102): 310-321.

(编辑 桂智刚)