

基于熵权-灰靶理论的滞洪区高速公路生态边坡决策方法及应用

朱晓东, 张兴宇, 薛丹璇, 何 佳

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074)

摘 要: 边坡防护方案的确定是公路设计阶段的重要环节, 决策结果的客观性、科学性直接影响公路全寿命周期的安全。目前滞洪区高速公路生态边坡方案的决策以定向的经验判断为主, 缺乏定量理论评价。为此, 基于二元定量比较法、熵权法、灰靶决策理论, 构建了一种滞洪区高速公路生态边坡评价决策模型。该模型从经济、技术、社会三方面综合考虑生态边坡方案决策的多种因素, 选取 11 个评价指标构建指标体系; 利用熵权法对指标权重进行计算, 降低人为主观因素影响, 并结合灰靶理论计算各评价方案靶心距, 进行优劣排序决策最优方案。最后以津石高速公路生态边坡方案决策为例, 对上述方法进行了应用验证。实践结果表明, 该评价模型能较为准确的评价滞洪区高速公路生态边坡方案的优劣程度, 具有一定的合理性和可行性。

关键词: 滞洪区高速公路; 生态边坡; 方案决策; 熵权法; 灰靶理论

中图分类号: U416+4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)10-0177-04

0 引 言

滞洪区内高速公路建设地质条件复杂, 施工难度较大, 其路基边坡常年受洪水浸泡、冲刷, 易产生水损害, 若防护不到位则严重影响公路的安全使用^[1]。以往滞洪区内高速公路边坡常采用浆砌片石等工程防护, 导致植物生长环境遭到破坏, 难以恢复到原有的生态环境。随着生态修复和水土保持成为研究热点, 生态护坡技术逐步引入公路建设, 如三维植被毯、生态袋、生态混凝土砌块、喷播等, 如何选择科学合理的生态护坡方案, 成为整个公路工程建设的关键。

目前国内研究人员对边坡方案决策、稳定性评价等开展相关研究, 构建了层次分析理论^[2]、模糊层次-主成分分析法^[3]、动态矩阵与灰色关联分析理论^[4]、效益成本估算法^[5]等, 为边坡方案决策提供了方法及理论基础, 但这些模型大多具有一定局限性, 应用范围相对有限, 并不能完全适用于滞洪区高速公路生态边坡方案的选择。

基于此, 本文从技术、经济、社会三方面考虑, 优选 11 个指标用于生态边坡方案评价; 针对生态边坡评价过程中的不确定性, 采用二元定量比较方法对指标属性值进行统一表征; 利用熵权法计算各指

标权重, 并基于靶心距理论评价生态边坡方案的优劣。最后, 将该方法应用于津石高速公路天津西段的生态边坡方案比选, 为该工程护坡方案决策提供科学依据。

1 评价决策体系的建立

滞洪区高速公路生态边坡方案决策是典型的多因素决策问题, 选取评价指标应满足科学性、独立性、层次性和预见性^[10]。本文将滞洪区高速公路生态边坡评价决策作为目标层, 以经济性、技术性、社会性三方面为准则层, 形成建设期成本、后期维护成本、抗冲刷能力等 11 项指标, 建立滞洪区高速公路生态边坡评价决策指标体系层次结构, 如表 1 所示。

2 多目标熵权-灰靶的生态边坡方案评价决策模型

2.1 熵权-灰靶决策模型原理

灰靶决策理论(Grey Target)是灰色系统理论中一种解决不确定性、多因素决策问题的有效方法^[6]。本文考虑到常规灰靶决策模型存在权重难以客观确定等不足, 提出了熵权-灰靶决策模型, 其构建思路见图 1, 具体构建步骤如下。

(1) 优选滞洪区高速公路生态边坡决策指标。

(2) 调查相关资料获取评价指标值, 构建评价样本矩阵 X 。

(3) 对矩阵 X 进行规范化处理得到决策矩阵 R 。

收稿日期: 2021-06-21

作者简介: 朱晓东(1964—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事道路工程专业工作。

表1 滞洪区高速公路生态边坡评价决策指标体系层次结构

目标层	准则层	指标层	指标内涵	类型
滞洪区高速公路生态边坡评价决策体系	经济性指标	建设期成本	工程造价	成本型
		后期维护成本	运营期间养护、监测费用等	成本型
	技术性指标	抗冲刷能力	抵抗洪水冲刷的能力	效益型
		耐浸泡性	抵抗洪水浸泡的能力	效益型
		防渗透性	行洪时防止洪水急剧渗透的性能	效益型
		耐久性	全寿命周期内保持健康状态的能力	效益型
		植被覆盖率	植被覆盖的比例	效益型
		施工难易程度	施工工艺及组织管理的复杂程度	成本型
	社会性指标	工期	施工周期	成本型
		景观性	绿化景观是否与周边自然环境相协调,是否美观	效益型
		环境影响	施工及运营期间对自然环境的扰动与破坏	成本型

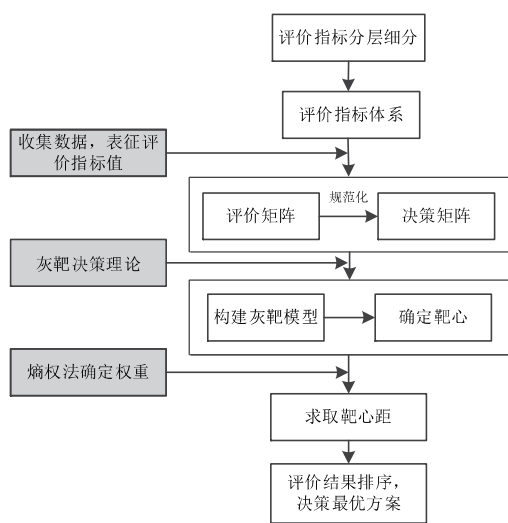


图1 熵权-灰靶决策模型流程图

(4)构建灰靶模型,确定最优决策向量(靶心)。

(5)采用熵权法计算各评价指标权重。

(6)基于加权欧式距离法构建靶心距计算模型,得到各方案靶心距。

(7)方案排序依照决策、评价生态护坡方案的优劣做出选择。

2.2 决策矩阵的构建

基于构建的滞洪区高速公路生态边坡综合评价体系,收集评价指标数据,确定评价矩阵。假设存在 n 个比选方案,每个方案有 m 项评价指标,组成评价集 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\} (i=1, 2, \dots, n)$ 。

评价集中部分指标,如:建设期成本、后期维护

成本、安全稳定系数等为定量指标,可用准确值表示。为消除量纲差异,需将成本型指标和效益型指标作适当变换形成无量纲标准化指标。

效益型指标:

$$\text{令 } r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_{1 \leq j \leq m} (x_{ij})} \quad (1)$$

成本型指标:

$$\text{令 } r_{ij} = \frac{\max_{1 \leq j \leq m} (x_{ij})}{x_{ij}} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为第 i 种方案中第 j 个评价指标对应的特征值; r_{ij} 为第 i 种方案中第 j 个评价指标变换后的指标值。

而另一部分指标如抗冲刷能力、耐浸泡性等指标为定性指标,难以用明确数值描述。针对不同生态护坡方案在同一定性指标下的优劣比较,可利用二元相对比较法^[7],得到二元比较矩阵 E ,其中 e_{ij} 的值由评价集中 X_i 与 X_j 的重要性决定,取值如表2所示。

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: e_{ij} 为方案 i 与方案 j 两两比较的结果; $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$ 。

表2 e_{ij} 的取值

矩阵因子值	X_i 比 X_j 重要	X_j 比 X_i 重要	X_i, X_j 同等重要
e_{ij}	1	0	0.5
e_{ji}	0	1	0.5

将 E 按行求和后排序,值最大的方案与其他方案两两比较,采用“显著”、“较为”、“同等”等模糊语气算子表示优劣水平对比结果。表3为语气算子与定量标度及指标值的对应关系,可将定性指标转为定量的指标值。

通过上述两种方法对指标值进行表征,处理后得到规范化处理决策矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: r_{ij} 为第 i 种方案中第 j 个评价指标变换后的指标值; $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

2.3 熵权法确定权重

熵权法属于客观赋权法,其思路是基于多个评

表 3 语气算子与定量标度对应指标值关系

语气	定量标度	对应指标值
同样	0.500	1.000
	0.525	0.905
稍稍	0.550	0.818
	0.575	0.739
略微	0.600	0.667
	0.625	0.600
较为	0.650	0.538
	0.675	0.481
明显	0.700	0.429
	0.725	0.379
显著	0.750	0.333
	0.775	0.290
十分	0.800	0.250
	0.825	0.212
非常	0.850	0.176
	0.875	0.143
极其	0.900	0.111
	0.925	0.081
极端	0.950	0.053
	0.975	0.026
无可比拟	1.000	0

价指标的变异性程度,来分配权重。熵权法赋权过程如下:

(1)决策矩阵同向化。对于 n 种评价方案, m 项评价指标,其中效益型指标为正向指标,值越高方案越优,成本型指标为负向指标,值越低方案越优。该方法要求评价指标的同向性,需进行同向化处理。

正向指标:

$$a_{ij} = \frac{r_{ij} - \min\{r_{1j}, \dots, r_{nj}\}}{\max\{r_{1j}, \dots, r_{nj}\} - \min\{r_{1j}, \dots, r_{nj}\}} \quad (5)$$

负向指标:

$$a_{ij} = \frac{\max\{r_{1j}, \dots, r_{nj}\} - r_{ij}}{\max\{r_{1j}, \dots, r_{nj}\} - \min\{r_{1j}, \dots, r_{nj}\}} \quad (6)$$

式中: r_{ij} 为第 i 种方案中第 j 个评价指标对应的特征值; a_{ij} 为第 i 种方案中第 j 个评价指标变换后的指标值。

(2)计算熵值与权重。第 j 个评价指标的熵 H_j 可定义为:

$$H_j = \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

$$\text{式中: } p_{ij} = \frac{(1+Y_{ij})}{\sum_{k=1}^m (1+Y_{kj})}, Y_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (a_{kj})^2}} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)。$$

$$\text{其指标权重为: } \omega_j = \frac{(1-H_j)}{m - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (8)$$

由此,各指标权重形成的矩阵

$$W = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \omega_m \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (9)$$

2.4 靶心距的计算

选取多因素灰靶决策的最优效果向量作为靶心。其中效益型指标对应最大值为最优效果向量,即 $r_j^0 = \max(r_{ij} | 1 \leq i \leq n)$; 成本型指标对应最小值为最优效果向量,即 $r_j^0 = \min(r_{ij} | 1 \leq i \leq n)$, 得到最优决策向量(靶心)为: $r_0 = \max\{r_1^0, r_2^0, \dots, r_m^0\}$ 。

根据加权欧式距离法构建测算模型, 得到比选方案的靶心距 d_i :

$$d_i = |R_i - r_0| = \sqrt{\omega_1(r_{(i,1)} - r_1^0)^2 + \omega_2(r_{(i,2)} - r_2^0)^2 + \cdots + \omega_m(r_{(i,m)} - r_m^0)^2} \quad (10)$$

式中: ω_j 为第 j 个评价指标的权重; $r_{(i,j)}$ 为第 i 种方案中第 j 个评价指标对应的指标值; $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

将方案靶心距 d_i 从小到大排序, d_i 值越大决策方案效果越差, d_i 值越小决策方案效果越优。

3 工程实例应用

津石高速公路天津西段全线位于天津静海区, 线路长约 12.5 km。其工程所在地区为贾口洼分洪区, 在贾口洼内由东向西先后以桥梁跨越黑龙港河、王口排干渠等排涝河道。根据现场勘察, 路线所在地区地势较为平坦, 土质以黏土、亚黏土为主, 地表以下 7~15 m 以下, 有粉细砂及粉砂质黏土, 粉砂等细粒物质为主。

3.1 生态边坡方案

考虑到行洪条件下桥头洪水流速较快, 为保护路基不受冲刷破坏, 试验段路基边坡防护初步拟定 3 种方案。方案一: 边坡采用加筋麦克垫护坡, 自坡面向上依次为喷附土层(由细粒土、肥料、团粒剂等组成, 为植物提供生长介质)、三维麦克垫、植物基材。该方案结构简单, 可用于坡面防护和植被再生, 绿化效果良好。方案二: 边坡采用三维土工垫生态护坡, 自坡面向上依次为复合土工垫(由反滤土工布和三向土工格栅组成)、生态袋、三向土工格栅、喷播层。该方案结构稳定, 施工便捷, 可防止水土流失, 具有良好的抗冲刷、防渗透能力和绿化效果。方案三: 边坡采用抗冲刷型植生混凝土护坡。该方案由天然碎石骨料、水泥、减水剂、稻草秸秆等按配比浇筑空心

砌块,孔内填充土壤并种植植物。该方案结构强度高,具有抗冲刷、能植被绿化特点,但施工技术较为复杂。

3.2 生态边坡方案综合评价

(1)获取评价数据

根据前文建立的滞洪区高速公路生态边坡综合评价指标体系,结合项目设计资料对建设期成本、植被覆盖率、工期3项指标进行定量评价;8项定性评价指标则邀请5位专家给出考量结果,综合考虑3种比选方案的评价结果(见表4)。

(2)构建决策矩阵

依据表4的数据,对于定量指标运用公式(1)~公式(2)表征指标值,定性指标则根据专家给出的两两比较结果,参照表3查询模糊语气算子确定指标值。经计算得到决策矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.429 & 0.538 & 0.538 & 0.538 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.538 \\ 0.914 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.95 & 1 & 0.75 & 1 & 1 \\ 0.762 & 0.538 & 0.538 & 0.429 & 0.538 & 0.429 & 0.9 & 0.333 & 0.5 & 0.818 & 0.538 \end{bmatrix} \quad (11)$$

(3)指标权重计算

运用熵权法对该工程生态护坡方案的指标进行评价,经Matlab计算得出所有指标对模型的贡献度(权重),结果如下。

$$R = [0.064 \ 0.060 \ 0.098 \ 0.098 \ 0.163 \ 0.098 \ 0.069 \ 0.060 \ 0.069 \ 0.060 \ 0.163] \quad (12)$$

(4)求解靶心距

结合决策矩阵 R ,筛选多因素灰靶决策的最优效果向量为:

$$r_0 = [0.762 \ 0.538 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0.333 \ 0.5 \ 1 \ 0.538] \quad (13)$$

由公式(10)得靶心距分别为 $d_1=0.411$, $d_2=0.283$, $d_3=0.349$ 。

按靶心距计算结果对生态边坡三种方案进行排序,方案二>方案三>方案一。由此得出津石高速公路试验路段最优生态边坡方案为方案二,即三维土工垫生态护坡,自坡面向上依次为复合土工垫(由反滤土工布和三向土工格栅组成)、生态袋、三向土工格栅、喷播层。

4 结 论

此次研究通过滞洪区高速公路生态边坡方案评价模型构建及其应用研究,得出如下结论:

(1)针对滞洪区高速公路生态边坡最优方案决策的特点,从经济、技术、社会3个方面确定了11个评价指标,构建滞洪区高速公路生态边坡方案评价体系。

(2)基于评价指标值的变异性程度,采用熵权法进行赋权,求解各指标熵值,从而确定权重,上述方

表4 生态边坡方案评价结果

评价指标	方案			
	方案一	方案二	方案三	
经济性	建设期成本	160元/m ²	175元/m ²	210元/m ²
	后期维护成本	一般	一般	较高
技术性	抗冲刷能力	一般	好	好
	耐浸泡性	较好	好	一般
	防渗透性	一般	较好	一般
	耐久性	较好	好	一般
	植被覆盖率	1	0.95	0.9
	施工难易程度	容易	容易	难
	工期	1.5	2	3
社会性	景观性	极好	极好	好
	环境影响	较小	小	较小

法弥补了主观、单一赋权方法的片面性。结合灰靶理论计算靶心距,得到各评价方案与最优靶心的相对距离,依据此距离体现评价方案的好坏程度,实现了对滞洪区高速公路生态边坡方案的定量评价。该方法的整体建模与应用过程较为高效、简明,结果直观。

(3)以津石高速公路生态边坡方案比选实例对熵权-灰靶理论的滞洪区高速公路生态边坡方案评价模型进行了验证,结果表明该模型能够较为准确地评价生态边坡方案的优劣,兼具可操作性与合理性。

参考文献:

- [1] 王祖东.行滞洪区内的路基设计[J].中外公路,2004,24(5):32-34.
- [2] 肖利勇,徐冠军,何剑,等.基于层次分析法的沙漠公路边坡生态防护方法评价[J].路基工程,2015(3):17-21.
- [3] 汪绿培,陈新新.基于模糊层次-主成分分析法的河道生态护坡综合评价[J].水利科技与经济,2018,24(8):38-42.
- [4] 王岩.基于动态综合评价法的生态护坡方案优选分析[J].水土保持应用技术,2019(1):12-15.
- [5] 贾致荣,郭忠印.公路边坡生态防护的定量评价方法[J].水土保持研究,2008(2):264-266.
- [6] 王霞.基于灰数信息的决策模型构建及其应用研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.
- [7] Lee H, Tomizuka M. Robust adaptive control using a universal approximator for SISO nonlinear systems [J]. IEEE Trans Fuzzy Syst, 2000, 8(1):95-106.