

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.20190419.017

基于变权计算的公路路线方案优选

康 虔^{1,2}, 陈穗宏¹, 张楚旋^{1*}, 王仲祥², 谭海勤²

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 湖南中大设计院有限公司, 湖南 长沙 410075)

摘要:针对传统的常权评价容易导致“状态失衡”, 提出一种公路路线方案变权重优选模型。首先, 根据方案优选影响因素构建指标体系, 运用 AHP 和变权重理论计算评价指标的变权重系数; 然后, 基于以上各影响因素及其权重, 构建变权重-TOPSIS 公路路线方案综合评判模型, 再对各方案优越度进行计算, 得出最优方案。采用该模型对湖南省某二级公路 A 点至 B 点的四个方案进行评价, 所得结果比传统的评判方法更贴近工程实际, 表明该优选模型工程可行性和有效性较高。

关键词:公路选线; 方案优选; 变权计算; 逼近理想解的排序法

中图分类号:U412.3; X951 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-0062(2019)04-0044-05

Optimal Selection of Route Scheme Based on Variable Weight Computing

KANG Qian^{1,2}, CHEN Suihong¹, ZHANG Chuxuan^{1*},
WANG Zhongxiang², TAN Haiqin²

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Zhongda Design Institute Co. Ltd., Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: Against the “state out of balance” phenomenon that occur in the models which use constant weights, a variable weight evaluation model is presented. Firstly, constructing the index system based on the influencing factors of optimizing schemes, then using AHP and variable weight theory to determine the weight coefficient which impact the route program evaluation; Secondly, based on the above factors and their weights, build VW-TOPSIS road routes schemes comprehensive evaluation model, then calculate each program by using the sorting method which can approximate the ideal solution to get their comprehensive excellent degrees. This rating system was applied to evaluate the four route projects of the highway from A to B, which is part of a second-class highway in Hunan province. The re-

收稿日期: 2018-12-08

基金项目: 湖南省教育厅一般项目(17C1375)

作者简介: 康 虔(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程灾害及控制方面的研究。E-mail: 35763205@qq.com。* 通信作者: 张楚旋(1988-), 女, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 82332390@qq.com

sults were more closer to engineering actualities than traditional method. It is revealed that this optimum selection model has high feasibility and validity.

key words: route selection; scheme optimization; variable weight calculation; technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

0 引言

公路选线是公路勘察设计过程中最重要的一个环节,是一个牵涉到多个方面、多因素的复杂决策问题^[1]。影响选线决策的因素不但包括定量因素,而且存在大量的定性因素,当前设计人员大多依靠工程经验进行判断,工程师经验极大地影响到最终的优选结果。尤其是在地质条件复杂地区进行公路选线的时候,最终推荐方案的选取受人为因素影响极大。

为了降低设计人员经验对道路选线工作的影响,国内外公路勘察设计人员对公路路线方案优选进行了深入的研究。S. Sadek^[2]基于GIS技术综合平纵横组合、地形地貌、边坡稳定性、环境影响性等指标对公路进行选线设计;M. W. KANG^[3]在S. Sadek的研究基础上,引入遗传算法对路线方案进行优化;黄淑琴^[5]提出了二级模糊数学模型对路线多方案进行综合评价;朱兴琳^[5]建立了公路路线设计分析模型计算路线方案的可靠度;张弛^[6]采用智能进化算法结合GIS系统中空间数据分析功能对我国冻土区内某公路进行智能选线;李军等^[7]对公路路线方案经济风险进行了风险因子概率传递评估。

路线方案优选工作虽然取得了一定成果,但各方案最终都只是采用常权进行评价,在某个因素的权重较小,但该项因素统计值处于边缘状态时却起重要作用时,对分析结果会产生较大影响,工程人员称之为“状态失衡”。

鉴于此,本研究引入变权计算,根据因素状态进行适量调节以期获得更贴近工程实际的因素权重,同时结合逼近理想解的排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)^[8]应用到山区公路路线方案优选。先运用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)法计算评判指标常权重,再根据变权计算细化指标变权重,最后结合TOPSIS法评价路线各方案的综合优越度,从而优选最佳路线方案。

1 构建路线方案优选模型

TOPSIS法是以评价对象靠近正理想解的距

离进行优劣排序,从而优选出最佳方案的一种方法^[9]。其中:正理想解各指标值均选自各方案的最优值;负理想解各指标值选自各方案的最差值。

1.1 构建评判初始矩阵

对 $A_1, A_2, \dots, A_m$ 共 m 个方案进行优选,其方案集记作 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 。方案评判指标为 $X_1, X_2, \dots, X_n$,各方案指标集记作 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。得到相应的评判指标 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$,以 x_{ij} 表示方案 i 中评判指标 j 的取值,可得评判初始矩阵 A :

$$A = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2 归一化决策矩阵

以上矩阵中各指标量纲和单位不同,故采用归一化处理以保证其可比性。标准化决策矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 构造方式如下:

1) 效益型指标:

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (2)$$

2) 成本型指标:

$$b_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (3)$$

1.3 权重向量的确定

进行变权计算时,若因素状态向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的变权映射 $w_j(j=1, 2, \dots, n), [0, 1]^n \rightarrow [0, 1], (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow w_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 满足^[10]:

归一性:

$$\sum_{j=1}^n w_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1 \quad (4)$$

连续性:

$$w_j(x_1, x_2, \dots, x_n) (j=1, 2, \dots, n)$$

关于每个变元连续。

单调性:

$$w_j(x_1, x_2, \dots, x_n) (j=1, 2, \dots, n)$$

关于变元 x_j 单调减小或增大。

$$W(X) = (w_1(X), w_2(X), \dots, w_n(X))$$

即变权向量,其 n 维惩罚型状态变权向量满足以下性质的映射 $S: [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]^n, X \rightarrow S(X) = (S_1(X), S_2(X), \dots, S_n(X))$, 则:

$$x_i \geq x_j \Rightarrow S_i(X) \leq S_j(X) \quad (5)$$

$S_j(X) (j=1, 2, \dots, n)$ 关于每个变元连续。

对于任意变权向量 $W(X)$, 都满足:

$$W \cdot S(X) = W(X) \cdot \sum_{j=1}^n (w_j S_j(X)) \quad (6)$$

式中: $W \cdot S(X) = (w_1 S_1(X), w_2 S_2(X), \dots, w_n S_n(X))$, 被称作 Hardarmard 乘积。

均衡函数应先确定形态及各指标权重与其状态值之间的变化关系,再选取调整因子进行构造。根据该函数即可求得维实函数的状态变权向量。由此可得状态变权向量表达式为:

$$S_j(X) = S(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial B(x)}{\partial x_j} \quad (7)$$

再由式(6)计算变权向量 W 。

1.4 建立加权标准化决策矩阵

由矩阵 B 和矩阵 W 的相应项相乘得到加权标准化决策矩阵 C :

$$C = (c_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} w_1 b_{11} & w_2 b_{12} & \cdots & w_n b_{1n} \\ w_1 b_{21} & w_2 b_{22} & \cdots & w_n b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1 b_{m1} & w_2 b_{m2} & \cdots & w_n b_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.5 评判对象贴近度计算

1.5.1 确定理想解:

$$\begin{cases} C^+ = \{(\max_{ij} c_{ij} | X_j \in J_1), (\min_{ij} c_{ij} | X_j \in J_2)\} \\ C^- = \{(\min_{ij} c_{ij} | X_j \in J_1), (\max_{ij} c_{ij} | X_j \in J_2)\} \end{cases} \quad (9)$$

式中, C^+ 和 C^- 分别表示正理想解和负理想解; J_1 和 J_2 分别表示效益型指标集和成本型指标集。

1.5.2 评判对象与理想解的距离如下:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中, d_i^+ 和 d_i^- 分别表示评判对象与正理想解和负理想解的距离; c_j^+ 和 c_j^- 分别表示正理想解和负理想解中相对应的元素。

1.5.3 确定评判对象与正理想解的贴近度

$$e_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, 0 \leq e_i^+ \leq 1 \quad (11)$$

e_i^+ 代表评判对象与正理想解的贴近程度,可以通过 e_i^+ 的大小降序排列,对各个方案进行优选。

2 工程应用

2.1 构建评价指标体系

以山区路线方案优选为例,构建路线方案优选指标体系如下:经济指标(P_1)含土石方(X_1),每公里平均桥隧长(X_2),项目预算额(X_3)三个影响因素;技术指标(P_2)含展线系数(X_4),最大纵坡(X_5),最小平曲线半径(X_6),平纵线型组合(X_7)四个影响因素;环境及社会影响(P_3)含环境影响(X_8),社会影响(X_9)两影响因素,建立路线方案的综合评价指标体系(O)。

2.2 实例分析

在湖南省某二级公路建设过程中,根据湖南中大设计院有限公司对 A 点至 B 点段勘察资料,提出以下 4 个可行方案:新建方案 I,采用大桥上跨某铁路;新建方案 II,通过开挖隧道避开某铁路;老路改建方案 III,部分路段降低设计指标利用某省道改建;老路改建方案 IV,降低设计指标完全利用某省道改建,各方案对应指标值见表 1。其中:定量指标由设计文件得出,定性指标 X_8 和 X_9 采用专家打分法进行量化,转化为半定量指标,赋予相应的分值参与到分析之中。

表 1 路线方案评价指标表

Table 1 Table of evaluation indicators for route schemes

方案	土石方 $X_1 / (\text{km}^3)$	每公里 平均桥隧长 $X_2 / (\text{m} \cdot \text{km}^{-1})$	项目预算额 $X_3 / (\text{万元})$	展线系数 X_4	最大纵坡 $X_5 / \%$	最小平 曲线半径 X_6 / m	平纵线型 组合 X_7	环境影响 X_8	社会影响 X_9
I	397.39	173.4	10 374.24	1.270	5	125	4	3	4
II	455.99	291.7	14 439.48	1.076	4	125	5	3	5
III	267.12	45.9	8 563.25	1.309	6	65	3	2	3
IV	186.54	0	8 285.58	1.456	6	30	3	1	3

注:不含小桥。

2.3 建立多属性决策矩阵

根据表1得到多属性决策矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 39.739 & 173.4 & 10374.24 & 1.270 & 5 & 125 & 4 & 3 & 4 \\ 45.599 & 291.7 & 14439.48 & 1.076 & 4 & 125 & 5 & 3 & 5 \\ 26.712 & 45.9 & 8563.25 & 1.309 & 6 & 65 & 3 & 2 & 3 \\ 18.654 & 0 & 8285.58 & 1.456 & 6 & 30 & 3 & 1 & 3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据式(2)、式(3),对该矩阵进行无量纲处理,得出归一化决策矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} 0.2175 & 0.4056 & 0.6606 & 0.4895 & 0.5000 & 0 & 0.5000 & 0 & 0.5000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7009 & 0.8426 & 0.9549 & 0.3868 & 0 & 0.6316 & 1.000 & 0.5000 & 1.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0 & 0 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.4 指标权重确定

2.4.1 常权重计算

根据层次分析法的基本原理^[11]计算各指标常权重:

$$W = \{0.179\ 7, 0.052\ 6, 0.307\ 3, 0.107\ 0, 0.081\ 2, 0.075\ 6, 0.033\ 2, 0.054\ 5, 0.108\ 9\}$$

2.4.2 构造状态变权向量

状态变权向量的构造与选取是实施变权的核心,实际运用中根据决策问题对均衡性的要求和各类状态变权向量特点选取。指数型状态变权向量具有参数设置灵活、决策要求体现明显、扩展能力强等优点被本次研究所借鉴,构造状态变权向量 $S(X_i) = (S_1(X_i), \dots, S_n(X_i))$ 如下:

$$S_j(X_i) = \begin{cases} e^{-\alpha(x_{ij}-\beta)} & (x_{ij} \leq \beta) \\ 1 & (x_{ij} > \beta) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $j=1, \dots, n; \alpha \geq 0; 0 < \beta \leq 1$ 。

β 即否定水平,在第 j 项指标状态值 x_{ij} 小于 β 时,通过实施变使增大其权重; α 即惩罚水平,反映决策对因素均衡性要求的强弱。决策者应根据研究对象的决策要求选定 α, β 值。

$$C = \begin{bmatrix} 0.043 & 0.023 & 0.208 & 0.033 & 0.092 & 0.077 & 0.037 & 0.000 & 0.059 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.109 & 0.092 & 0.077 & 0.046 & 0.002 & 0.045 \\ 0.137 & 0.048 & 0.300 & 0.011 & 0.092 & 0.028 & 0.035 & 0.024 & 0.000 \\ 0.196 & 0.057 & 0.335 & 0.000 & 0.092 & 0.000 & 0.000 & 0.030 & 0.007 \end{bmatrix}$$

2.5.2 计算评价对象与理想解的距离

根据式(7)和式(8)计算各方案与理想解的距离。

各方案综合评判指标体系中,土石方、每公里

$$\begin{cases} c^+ = (0.164, 0.048, 0.281, 0.076, 0.115, 0.101, 0.035, 0.050, 0.098) \\ c^- = (0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.058, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000) \end{cases}$$

四个方案与正理想解和负理想解的距离分别

2.4.3 确定变权向量矩阵

根据各指标归一化之后的情况,可以认为归一化之后小于 0.5 的指标为估计值处于边缘状态,故取否定水平为 $\beta=0.5$,惩罚水平为 $\alpha=0.8$,结合公式(6)、公式(13)、公式(14)以及常权向量 W ,可以求得变权向量为:

$$W_I = \{0.202\ 1, 0.050\ 9, 0.275\ 7, 0.096\ 8, 0.072\ 9, 0.101\ 2, 0.029\ 8, 0.072\ 9, 0.097\ 7\};$$

$$W_{II} = \{0.191\ 6, 0.056\ 1, 0.327\ 6, 0.076\ 5, 0.058\ 0, 0.080\ 6, 0.035\ 4, 0.058\ 1, 0.116\ 1\};$$

$$W_{III} = \{0.171\ 1, 0.050\ 1, 0.292\ 6, 0.111\ 6, 0.115\ 4, 0.072\ 0, 0.031\ 6, 0.051\ 9, 0.103\ 7\};$$

$$W_{IV} = \{0.164\ 5, 0.048\ 0, 0.281\ 3, 0.146\ 1, 0.110\ 9, 0.069\ 2, 0.030\ 4, 0.049\ 9, 0.099\ 7\};$$

2.5 最优方案确定

2.5.1 计算加权标准化决策矩阵

根据式(11)与式(6)计算出加权标准化决策矩阵 C

平均桥隧长、项目预算额、展线系数、最大纵坡,环境影响等指标属于成本型指标,最小平曲线半径、平纵线型组合和社会影响等指标属于效益型指标,可得到正理想解和负理想解分别为:

$$\text{为: } \begin{cases} d_1^+ = 0.030 \\ d_1^- = 0.058 \end{cases}$$

2.5.3 计算评价对象贴近度

根据公式(9)计算出各方案贴近度 E^+ :

$$E^+ = (0.658, 0.154, 0.874, 0.809)$$

各路线方案的综合优越度为:方案 I 65.8%; 方案 II 15.4%; 方案 III 87.4%, 方案 IV 80.9%。方案的优劣次序为: III > IV > I > II, 方案 III (部分利用 S305 改建) 最优。

根据以上分析,使用变权重理论对各影响因素权重进行计算之后,因素权重根据该因素统计值的不同而发生变化。在影响因素统计值趋于边缘状态时,采用本分析方法能够提高该指标在分析过程中的权重,取得的分析结果更为符合工程实际。

3 结 论

1) 本文探讨了变权重理论的在山区公路路线方案优选中的应用价值,在路线方案进行常权比较的前提下,引入变权计算细化其指标权重,结合 TOPSIS 法建立了更为贴近工程实际的综合评判模型,避免多因素共同作用时理论和实际的偏差造成评判结果不合理。

2) 将该模型用于湖南省某二级公路 A 点至 B 点 4 种路线方案的综合优越度计算,确定路线方案 III 最优。设计人员同样可根据项目等级、地质条件等情况的不同选取最重要的影响指标构建更贴近项目实际情况的分析模型。

参考文献:

- [1] LUQUE R, CASTRO M. Highway geometric design consistency: speed models and local or global assessment

[J]. International journal of civil engineering, 2016, 14 (6): 347-355.

- [2] SADEK S, KAYSI I, BEDRAN M. Geotechnical and environmental considerations in highway layouts: an integrated GIS assessment approach [J]. International journal of applied earth observations & geoinformation, 2000, 2 (3): 190-198.
- [3] KANG M W, JHA M K, SCHONFELD P. Applicability of highway alignment optimization models [J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2012, 21 (1): 257-286.
- [4] 黄淑琴. 公路路线方案的多级综合模糊评价 [J]. 中国公路学报, 1997, 10 (3): 37-44.
- [5] 朱兴琳. 基于可靠度理论的公路路线设计 [J]. 长安大学学报, 2010, 30 (4): 46-50.
- [6] 张驰, 杨坤, 汪双杰, 等. 青藏高原多年冻土区公路智能选线方法 [J]. 交通运输工程学报, 2016, 16 (4): 14-25.
- [7] 李军, 黄海宁, 徐志胜. 基于风险因子概率传递的公路选线经济风险评估 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16 (2): 49-52.
- [8] 户佐安, 蒲政, 包天雯, 等. 基于 TOPSIS 法和灰色理论的交通信息网络布局优选 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16 (3): 38-45.
- [9] WU J, SUN J S, ZHA Y, et al. Ranking approach of cross-efficiency based on improved TOPSIS technique [J]. Journal of systems engineering and electronics, 2011, 22 (4): 604-608.
- [10] 康虔, 王新民, 蒲浩, 等. 基于变权-未确知测度理论的岩溶路基稳定性分析 [J]. 东北大学学报, 2016, 37 (3): 435-439.
- [11] 王新民, 康虔, 秦健春, 等. 层次分析法-可拓学模型在岩质边坡稳定性安全评价中的应用 [J]. 中南大学学报, 2013, 44 (6): 2455-2462.

(责任编辑: 扶文静)

(上接第 43 页)

- [3] 杜雅兰, 黄明娟, 周丽铭. 全面通风与局部通风的应用分析 [J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2014, 4 (3): 143-147.
- [4] 第五徐涛. 多热源作用下侧吸罩流场及捕集效率特性的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016: 1-98.
- [5] HUANG Y, WANG Y, LIU L, et al. Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant [J]. Building and environment, 2015, 85: 94-103.
- [6] 邢金城, 李元辰, 凌继红, 等. 高截面单双侧条缝式槽边排风罩排风量的影响因素 [J]. 暖通空调, 2017, 47 (2): 88-92.
- [7] 房俊格. 伴有热污染的气幕上吸罩流场特性分析 [J]. 洁净与空调技术, 2008 (2): 24-28.

- [8] 刘波. 多污染源共同作用对工业建筑室内污染物浓度分布的影响 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015: 1-83.
- [9] 王怡, 刘波, 曹莹雪, 等. 双污染源对室内浓度场分布影响的数值模拟研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2015, 47 (4): 592-597.
- [10] 李聪聪, 曹莹雪, 王怡. 多污染源对工位污染物浓度贡献率的研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36 (11): 31-36.
- [11] HUANG Y Q, WANG Y, LIU L, et al. Performance of constant exhaust ventilation for removal of transient high-temperature contaminated airflows and ventilation-performance comparison between two local exhaust hoods [J]. Energy and buildings, 2017, 154: 207-216.

(责任编辑: 周泉)