

基于 AHP-TOPSIS 的桥梁设计方案优选决策模型

王智远^{1,2}, 李国栋¹, 王勇华¹

(1. 内蒙古大学 交通学院, 呼和浩特 010070; 2. 长安大学 公路学院, 西安 710064)

摘要:为了对桥梁设计方案进行优化选择,建立了 AHP-TOPSIS 的桥梁设计方案优选决策模型。该模型引入逼近理想解排序法(TOPSIS)对桥梁设计方案进行优选决策,选取 10 个评价指标,采用层次分析法确定指标权重,避免了人为赋予指标权重的主观影响,提高了指标权重的科学性和客观性。运用该评价模型对某跨河大桥 4 个初选设计方案($Y_1 \sim Y_4$)进行评价,计算出每个方案综合优越度分别为:62.5%, 74.6%, 18.1%, 64.6%, $Y_2 > Y_4 > Y_1 > Y_3$, 因此确定 Y_2 为最优方案,将该方案应用于桥梁建设,取得了良好效果。

关键词:道路工程;桥梁设计;优选决策模型;逼近理想解排序法;层次分析法

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2017)02-0478-05

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201702018

Optimization decision model for bridge design based on AHP-TOPSIS

WANG Zhi-yuan^{1,2}, LI Guo-dong¹, WANG Yong-hua¹

(1. Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China; 2. College of Highway, Chang'an University, Xian 710064, China)

Abstract: In order to optimize the selection of bridge design scheme, an optimization model of bridge design scheme based on AHP-TOPSIS was established. The Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) was introduced into the model to optimize the selection of the bridge design scheme. Ten evaluation indicators were selected and the weights of the indicators were determined using Analytical Hierarchy Process (AHP) method to avoid shortcoming that the indicator weights were influenced by the subjectivity of the decision maker. The method improved the scientificness and objectivity of indicator weights. This model was applied to evaluate four schemes of crossing bridge design. The comprehensive superiorities of the four schemes were calculated as: 62.5%, 74.6%, 18.1% and 64.6%. So the schemes were ranked as $Y_2 > Y_4 > Y_1 > Y_3$, and scheme Y_2 was the optimal one. Scheme Y_2 was applied to bridge construction and good results were achieved.

Key words: road engineering; bridge design; optimization decision model; technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS); analytic hierarchy process (AHP)

收稿日期:2015-11-20.

基金项目:国家自然科学基金项目(51478203);交通运输部西部科技项目(200831849404).

作者简介:王智远(1965-),男,副教授.研究方向:桥梁结构可靠性. E-mail:nmgzyh0845@163.com

通信作者:李国栋(1983-),男,讲师,博士研究生.研究方向:混凝土桥梁裂缝控制与加固.

E-mail:lgd567@imu.edu.cn

0 引言

桥梁设计方案的选择是桥梁工程中的关键环节,科学合理的设计方案能够保证桥梁在使用中安全、可靠,延长桥梁的使用期限,美化桥梁的外观。因此,选择合适的桥梁设计方案显得尤为重要^[1]。桥梁设计方案的选择受到不同层次的多个因素影响,而传统的经验法、类比法选择设计方案受人为主观影响较大,且只能针对个例进行选择应用,没有普适性和推广价值。近年来,专家学者多采用模糊数学^[2,3]、BP 神经网络^[4]、灰色理论^[5-7]、集对分析^[8,9]、等数学优选模型解决涉及多层次、多指标的方案优选决策问题。这些数学模型虽然被广泛运用,且取得一定的效果,但仍然存在一些不足。为此,本文选择了评价合理客观、运用灵活的逼近理想解排序法(TOPSIS)和层次分析法(AHP)相结合,先利用 AHP 法对影响指标进行分层别类,确定指标权重,再结合 TOPSIS 法建立桥梁设计方案的优选决策模型。

1 AHP 法确定指标权重

AHP 法具有将混乱的评价指标分门别类、逐级分层等优点,可以由上到下构建出目标层、准则层和指标层组成的评价指标体系^[10]。在赋予指标权重时,利用下层指标对相邻上层指标的影响确定指标权重。

1.1 比较标度

采用二元对比法对同层的指标进行两两比较,根据其相对重要性对指标进行赋值。赋值依据为 Saaty^[11]提出的 1~9 的比较标度表,见表 1。

表 1 1~9 比较标度表

Table 1 Comparable scale of 1~9

标准值	定义	注释
1	同样重要	指标 X_i 和 X_j 同样重要
3	稍微重要	指标 X_i 比 X_j 稍微重要
5	明显重要	指标 X_i 比 X_j 明显重要
7	强烈重要	指标 X_i 比 X_j 强烈重要
9	绝对重要	指标 X_i 比 X_j 绝对重要

说明:标准值 2,4,6,8 分别表示 1 和 3,3 和 5,5 和 7,7 和 9 之间的指标重要程度;若 $W_{ij} = X_i/X_j$, 则 $1/W_{ij} = X_j/X_i$ 。

1.2 建立判断矩阵

建立判断矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})$, 将每层评价指标进行两两比较,参照比较标度表把下一层指标对相邻上一层的指标的影响转化为相对刻度读数,构

造下一层指标对上一层指标的判断矩阵:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{nl} & \cdots & X_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_1}{X_1} & \cdots & \frac{X_1}{X_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{X_n}{X_1} & \cdots & \frac{X_n}{X_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

求判断矩阵 \mathbf{X} 的最大特征根和特征向量, $\mathbf{AW} = \lambda_{\max} \mathbf{W}$, 得出的 \mathbf{W} 经过归一化作为指标的排序权重。由于矩阵 \mathbf{X} 为正定互反矩阵,由其数学性质可知,存在最大特征值 λ_{\max} 且唯一。但是,对于矩阵 \mathbf{X} 很难求出其精确的 λ_{\max} 和 \mathbf{W} , 且本文并不需要追求较高的精确度,因为判断矩阵 \mathbf{X} 本身有一定的误差范围,因此可采用“方根法”求其近似值^[12]。

1.3 一致性检验

由于判断矩阵受到多层指标的不同程度影响,和决策者的主观经验干扰,难免存在误差。因此,为了避免误差过大,导致判断结果偏离客观实际,需对判断矩阵进行一致性检验。一致性检验公式为:

$$C_R = C_I / R_I$$

式中: C_R 为一致性比率; C_I 为一致性指标, $C_I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, n 为判断矩阵的阶数; R_I 为随机一致性指标,当判断矩阵阶数分别为 1, 2, ..., 9 时, R_I 的取值分别为 0.00, 0.00, 0.58, 0.96, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45。若 $C_R < 0.1$, 则认为判断矩阵通过一致性检验;否则,应重新对判断矩阵的元素进行比较取值,直到通过一致性检验为止。

2 AHP-TOPSIS 优选决策模型

2.1 TOPSIS 理论

逼近理想解排序法(TOPSIS)的基本原理是设定方案的正、负理想解,根据待选方案到正、负理想解的距离大小进行排序^[13,14]。正理想解是一个虚拟的最优解,里面的评价指标都是最优值,而负理想解则是虚拟的最差解,它包含的评价指标都是最差值。倘若待选方案离正理想解的距离最近,同时又离负理想解的距离最远,则该方案为最优方案,反之为最差方案。

2.2 构建初始评判矩阵

设有 m 个待选方案, n 个评价指标, 则待选方案集为 $F = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$, 指标集为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。因此,初始评判矩阵 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = (X_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{ml} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个方案的第 j 个评价指标。

2.3 标准化决策矩阵

由于评价指标之间具有不同的量纲和量纲单位, 不具有对比性, 为了消除指标之间的不可公度性, 对评价指标进行无量纲化处理。

对于越大越优型指标:

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (3)$$

对于越小越优型指标:

$$b_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (4)$$

经过无量纲化处理后, 得到标准决策化矩阵 \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = (b_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{ml} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.4 加权标准化决策矩阵

将标准决策化矩阵 \mathbf{B} 与指标权重向量 \mathbf{W} 相乘, 得到加权标准化决策矩阵 \mathbf{C} :

$$\mathbf{C} = (C_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} w_1 b_{11} & \cdots & w_n b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ w_1 b_{ml} & \cdots & w_n b_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.5 计算评价对象贴近度

评价对象的正理想解 C^+ 和负理想解 C^- 可表示为:

$$\begin{cases} C^+ = \{(\max c_{ij} \mid j \in J_1), (\min c_{ij} \mid j \in J_2)\} \\ C^- = \{(\min c_{ij} \mid j \in J_1), (\max c_{ij} \mid j \in J_2)\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: J_1 为越大越优型指标集; J_2 为越小越优型指标集。

评价对象与理想解之间的距离 D 为:

$$D = \begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: D_i^+ 、 D_i^- 分别为评价对象距正、负理想解的距离; c_j^+ 、 c_j^- 分别为 C^+ 、 C^- 中相对应的元素。

评价对象与正理想解的贴近度 E_i^+ 为:

$$E_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (9)$$

式中: $E_i^+ \in [0, 1]$, 当评价对象趋近于正理想解时, E_i^+ 趋近于 1; 当评价对象趋近于负理想解时, E_i^+ 趋近于 0。因此, 贴近度的大小能够反映出评价方案与正、负理想解的远近程度。

2.6 综合评价

将评价对象到正理想解的贴近度矩阵 \mathbf{E} 和相对应的指标权重向量 \mathbf{W} 相乘, 得到综合评价结果向量 \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = \mathbf{W} \times \mathbf{E} \quad (10)$$

3 实例应用

3.1 桥梁设计方案综合评价指标体系

以某跨河桥梁为例, 根据现场实际, 初步设计了 4 个待选方案, 进行优选决策。桥梁设计方案的优选涉及到不同层次的多种因素指标的影响, 因此根据 AHP 法原理分步逐层建立科学、合理的评价指标体系。如表 2 所示, 本文利用 AHP 法建立桥梁设计方案综合评价指标体系 (O) 和准则层 (P): 经济指标 (P_1), 技术指标 (P_2), 安全

表 2 各方案的综合评价指标体系

Table 2 Synthetic assessment indexes system of schemes

项目层			Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
目标层	准则层	指标层				
O	P_1	$X_1 / \text{万元}$	1950	2238	1496	1778
		$X_2 / \text{万元}$	105	120	150	85
		X_3	0.55	0.45	0.85	0.75
		X_4 / m	215	230	192	205
		$X_5 / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	12.5	14	10.5	11.5
	P_2	X_6	0.65	0.65	0.75	0.55
		X_7 / d	12	14	9	11
		X_8	0.85	0.85	0.65	0.65
		X_9	0.75	0.85	0.55	0.75
		X_{10}	0.65	0.75	0.55	0.75

指标(P_3),对应的指标层(X)为桥梁造价(X_1),临时工程费用(X_2),后期养护(X_3),主孔跨度(X_4),承载能力(X_5),施工难易(X_6),施工工期(X_7),施工安全性(X_8),桥梁耐久性(X_9),抗风险能力(X_{10})。

3.2 确定指标权重

首先利用层次分析法构建目标层对于准则层的O-P判断矩阵,如表3所示。

表3 O-P判断矩阵

Table 3 Judge matrix of O-P membership

O	P_1	P_2	P_3	权重	归一化权重
P_1	1	1/2	1	2.5	0.25
P_2	2	1	2	5.0	0.50
P_3	1	1/2	1	2.5	0.25

检验O-P判断矩阵的一致性,由权重向量可得 $\lambda_{\max} = 3$, $C_1 = 0$,查表知 $R_1 = 0.58$,从而 $C_R = C_1 / R_1 = 0 < 0.1$,满足一致性检验标准。因此,权重向量 $\mathbf{W} = [0.25, 0.5, 0.25]$ 在误差范围内,可以接受。同理,可求出指标层中的评价指标权重系数。

$$\mathbf{W}_1 = [0.1425, 0.0725, 0.035]$$

$$\mathbf{W}_2 = [0.13, 0.26, 0.065, 0.045]$$

$$\mathbf{W}_3 = [0.1575, 0.04, 0.0525]$$

3.3 计算指标贴近度

3.3.1 经济指标评判

根据式(2)构建经济指标的初始评判矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1950 & 105 & 0.55 \\ 2238 & 120 & 0.45 \\ 1496 & 150 & 0.85 \\ 1778 & 85 & 0.75 \end{bmatrix}$$

根据式(3)~(6)计算经济指标的加权标准化矩阵:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0.0553 & 0.0500 & 0.0263 \\ 0 & 0.0334 & 0.0350 \\ 0.1425 & 0 & 0 \\ 0.0884 & 0.0725 & 0.0088 \end{bmatrix}$$

桥梁造价、临时工程费用、后期养护都属于越小越优型指标,由式(7)可得经济指标的正、负理想解分别为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{C}^+ = (0.0000, 0.0000, 0.0000) \\ \mathbf{C}^- = (0.1425, 0.0725, 0.0350) \end{array} \right.$$

各待选方案到正负理想解的距离为:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1^+ = 0.0790 \\ D_1^- = 0.0905 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} D_2^+ = 0.0484 \\ D_2^- = 0.1478 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_3^+ = 0.1425 \\ D_3^- = 0.0805 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} D_4^+ = 0.1147 \\ D_4^- = 0.0601 \end{array} \right.$$

则待选方案到正理想解的贴近度为:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{11}^+ = 0.534 \\ E_{12}^+ = 0.753 \\ E_{13}^+ = 0.361 \\ E_{14}^+ = 0.344 \end{array} \right.$$

由此可知,在经济指标中,方案2为最优方案。

3.3.2 技术指标和安全指标评判

可以计算出技术指标和安全指标中待选方案到正理想解的贴近度为:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{21}^+ = 0.575 \\ E_{22}^+ = 0.901 \\ E_{23}^+ = 0.181 \\ E_{24}^+ = 0.804 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{31}^+ = 0.923 \\ E_{32}^+ = 0.430 \\ E_{33}^+ = 0.00 \\ E_{34}^+ = 0.633 \end{array} \right.$$

由此可知,在技术指标评判中,方案2最优,经济指标评判中方案1最优。

3.4 确定最优桥梁设计方案

由评价指标贴近度构造的矩阵E为:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0.534 & 0.753 & 0.361 & 0.344 \\ 0.575 & 0.901 & 0.181 & 0.804 \\ 0.923 & 0.430 & 0.000 & 0.633 \end{bmatrix}$$

权重向量 $\mathbf{W} = [0.25, 0.5, 0.25]$,由式(10)计算待选方案的综合优越度为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{W} \times \mathbf{E} = [0.625, 0.746, 0.181, 0.646]$$

综上可知,桥梁设计方案的综合优越度为62.5%、74.6%、18.1%、64.6%,待选方案的优劣排序为:方案2>方案4>方案1>方案3。因此,方案2为最优方案。

4 结论

(1)提出了一种基于AHP-TOPSIS的桥梁设计方案优选决策模型,结合经济、技术、安全三个方面确定了10项评价指标,采用层次分析法确定了指标权重,避免了人为赋予权重主观性和片面性的影响。

(2)将该模型应用于某跨河桥梁设计方案优选,计算得出每个方案的综合优越度分别为62.5%、74.6%、18.1%、64.6%,可知,方案2>方案4>方案1>方案3,因此方案2为最优方案。

(3)经工程实践证明了基于AHP-TOPSIS该模型的桥梁设计方案优选决策模型的可行性,

实现了桥梁设计方案科学、准确、合理的选择，可以将其推广至其他类似领域。

参考文献：

- [1] 张哲,王会利,石磊,等.桥梁方案多层多目标模糊优选模型及其应用[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(9):1567-1571.
Zhang Zhe, Wang Hui-li, Shi Lei, et al. Application of multi levels and multi objectives fuzzy optimization model of bridge type selection[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(9): 1567-1571.
- [2] 贾俊妮,叶少友,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 Jun-ni, Ye Shao-you, Yu Zhen-hua. Fuzzy comprehensive evaluation applied in city bridge scheme design[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2008, 31(2): 233-236.
- [3] 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 Yuan-fu, Xue Bo, Deng Yu-cai. 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.
- [4] 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 Cheng-xiang, Fu Cheng-qun, Wu Hai-peng, et al. Application of GA-BP arithmetic in evaluation model of bridge blasting program [J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(8): 229-232.
- [5] 王成,邹毅松,瞿光义.灰色理论在桥梁方案比选中的应用[J].重庆交通学院学报,1999,18(4):125-130.
Wang Cheng, Zou Yi-song, Qu Guang-yi. Grey system theory in the selection of bridge design plans [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1999, 18(4): 125-130.
- [6] 孙吉书,陈朝霞,余龙,等.基于灰色关联分析法的桥梁型式多方案选择[J].河北工业大学学报,2011,40(6):88-92.
Sun Ji-shu, Chen Zhao-xia, Yu Long, et al. Multi-scheme selection of bridge types based on grey correlation analysis[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2011, 40(6): 88-92.
- [7] 包龙生,刘克同,于玲.基于灰色层次分析法的桥梁施工方案多目标风险分析及评价[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2009,25(4):663-669.
Bao Long-sheng, Liu Ke-tong, Yu Ling. Multi-objective risk analysis and documents assessment of bridge construction based on AHP-GRAY[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, 25(4): 663-669.
- [8] 刘宏胜,刘德顺,李峰.桥梁设计方案比选的熵集对分析模型[J].山西建筑,2014,40(22):198-199.
Liu Hong-sheng, Liu De-shun, Li Feng. Entropy analysis model of bridge design scheme comparison [J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(22): 198-199.
- [9] 胡圣能.桥梁景观评价的集对分析模型[J].郑州大学学报:工学版,2013,34(4):36-39.
Hu Sheng-neng. Set pair analysis model for bridge landscape assessment [J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2013, 34 (4): 36-39.
- [10] 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 Xin-min, Zhao Bin, Zhang Qin-li. Mining method choice based on AHP and fuzzy mathematics [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(5): 875-880.
- [11] 黄贯虹,方刚.系统工程方法与应用[M].广州:暨南大学出版社,2005.
- [12] 苑栋,王海宁,刘浩,等.基于改进 AHP-FCE 的采场结构参数优化[J].中国矿业,2015,24(增刊 1):315-319.
Yuan Dong, Wang Hai-ning, Liu Hao, et al. Optimization on stope structural parameters based on improved AHP and FCE[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(Sup. 1): 315-319.
- [13] 王新民,秦建春,张钦礼,等.基于 AHP-TOPSIS 评价模型的姑山驻留矿采矿方法优选[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(3):1131-1137.
Wang Xin-min, Qin Jian-chun, Zhang Qin-li, et al. Mining method optimization of Gu mountain stay ore based on AHO-TOPSIS evaluation model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 1131-1137.
- [14] 龚剑,胡乃联,崔翔,等.基于 AHP-TOPSIS 评价模型的岩爆倾向性预测[J].岩石力学与工程学报学报,2014,33(7):1442-1448.
Gong Jian, Hu Nai-lian, Cui Xiang, et al. Rock-burst tendency prediction based on AHP-TOPSIS evaluation model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1442-1448.