

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.05.025

# 双基点迭代赋权法在桥梁工程中的应用

梁力<sup>1</sup>, 邢观华<sup>1</sup>, 吴凤元<sup>2</sup>

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁沈阳 110168)

**摘 要:** 指标权重的准确与否是解决评估问题的关键因素之一,但主、客观赋权法存在各自弊病.因此,提出一种基于双基点分析的群决策赋权法.通过层次分析采集专家主观权重,并以其均值作为初始正基点,将各权重序列相对于正基点标准化后构造最小欧式距离的优化问题,解得专家可信度并修正主观权重.将修正后的权重作为正基点多次迭代,直到结果收敛于最优权重.通过引入实例验证了权重的迭代削弱了偏差过大的权重对最终赋权结果的影响,将可信度与主观权重融合的过程兼顾了主、客观赋权法各自的优点,提高了赋权结果的科学性.

**关键词:** 双基点分析;指标权重;群决策;层次分析;桥梁工程

中图分类号: U 448.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)05-0740-05

## Application of Double Base Point Iterative Weighting Method in Bridge Engineering

LIANG Li<sup>1</sup>, XING Guan-hua<sup>1</sup>, WU Feng-yuan<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China. Corresponding author: XING Guan-hua, E-mail: xingghhh@163.com)

**Abstract:** Accuracy of the indicator weight is one of the keys to the assessment problem and the subjective and objective weighting methods have their own drawbacks. Thus, a group decision-making weighting method based on double base point analysis is proposed. The subjective weights of experts are collected by AHP. Taking the subjective weighted average as the initial positive and negative basis, the weight sequence is normalized relative to the positive base. The minimum Euclidean distance is constructed to solve the expert credibility and correct the subjective weights. The revised weight is repeated as a positive basis point until the result converges to the optimal weight. A case study verifies that the iteration of weight weakens the influence of over-ambiguous weight on the final weighting result. The process of merging credibility and subjective weight takes into account the respective advantages of the subjective and objective weighting methods, and it improves the scientificity of the empowerment results.

**Key words:** double base point analysis; index weight; group decision making; level analysis; bridge engineering

进入21世纪,我国土木工程建设迈入建养并重的时代,多指标评估成为工程领域的热点研究方向之一,对于大型建筑的安全运营和维修养护具有重要的指导意义.其中,指标权值的准确与否是解决评估问题的关键因素之一.但受认知水平的限制,现阶段不可能完全准确地量化指标对评估目标的重要程度,因此需要寻找更加准确合理

的赋权方法,提高指标权重的精确程度.

以层次分析法(AHP)为代表的主观赋权法的核心在于专家意见的反馈,目前在决策评估领域应用相当广泛<sup>[1-2]</sup>.但AHP的赋权过程完全依赖专家的经验 and 判断,受知识背景、个人偏好、评估问题复杂程度等多种因素影响,AHP赋权结果具有显著的主观随意性,有时针对同一问题,不同

专家甚至难以得出趋同的赋权结果。

客观赋权法的核心在于数据分析处理的方法,通过挖掘不同权重序列内在的规律,进而确定指标权重。这类方法包括 CRITIC 法<sup>[3]</sup>、熵权法<sup>[4]</sup>等。相对于主观赋权法,客观赋权法所得结果完全基于数据内部规律,回避了人的主观不确定性,但得出的结果往往与实际认知相悖,因此一般不能单独使用。

为减弱专家判断的偏差,屈兵等<sup>[5]</sup>提出一种基于群决策理论的改进 AHP 法,引入区间数标度和加权集值统计理论,确定了斜拉桥评估中各构件的权重;Ishizaka 等<sup>[6]</sup>提出一种新的标度方法,降低了构造判断矩阵时指标两两比较的困难,但上述两种方法的计算量都比较大,适用性相对较差。目前,为克服主、客观赋权法各自的弊病,亟需一种简单有效的综合赋权法。

桥梁评估大多以安全性、缺损或运营状况为目标,评估中涉及多个层次、多个构件和多项指标,权重则是这些构件和指标对于评估目标重要程度的标尺。大多数情况下,仅凭个人难以保证赋权结果的可靠性,往往需要统一多位专家的意见,完成群体决策的过程,这符合人类解决复杂问题的习惯<sup>[7-8]</sup>。但是,当不同评估主体给出的指标权重离散性较大时,评估结果的可信程度也相应降低。

本文提出一种主、客观相结合的群决策赋权法,首先基于专家主观权重构造正、反两个基点和关于双基点的距离最优化问题,求解得到各专家权重序列的可信度。将可信度与主观权重结合得到综合权重,再将其代入最优化问题迭代,结果收敛于最优权重。实例证明这种方法可以弱化与主体偏差较大的权重序列对最终赋权结果的影响,并避免了单纯使用主、客观赋权法的局限性。

## 1 AHP 主观赋权

AHP 是一种通过比较矩阵量化人脑主观判断的决策方法,目前已广泛应用于解决各类评估问题。通过逐个比较各关联因素对某一目标的重要程度得到判断矩阵,进而通过求解特征向量的方式得到各指标权重,为实际问题的层次划分、指标赋权等提供了定量依据<sup>[9]</sup>。

AHP 属于典型的主观赋权法,其权重值完全依赖于专家填写的比较矩阵,而专家群体受认知、心理因素等影响,对同一决策问题通常持有不同意见,严重影响了赋权结果的可靠性。部分文

献<sup>[10-11]</sup>通过构造区间判断矩阵、使用新型标度等方法改进 AHP,但这些方法普遍存在计算量大、适用性差等缺陷,而且没有从根本上摆脱主观赋权法的局限。

本文提出的方法适用于绝大部分主观赋权结果的修正,但为验证方法的有效性和适用性,以 AHP 赋权结果为例进行说明是最佳选择。

## 2 TOPSIS 客观修正

主观赋权实质上是一种专家意见协调和汇总的过程,各个专家仅凭主观方法上的优化难以保证效果,关键在于如何发掘专家意见中的规律。

双基点分析(TOPSIS)是一种常用的优选方法,通过样本点与理想点(正基点)、反理想点(反基点)的距离来评价和筛选方案,具有概念清晰、简便易行的优点<sup>[12]</sup>。

假设某优选问题涉及到  $n$  个指标,  $m$  个备择系统,则可组成一个  $n \times m$  的指标矩阵。其中备择系统  $j$  经标准化后的序列为  $\mathbf{r}_j = (r_{1j}, \dots, r_{nj})^T$ , 其理想序列为  $\mathbf{r}_j^+ = (1, \dots, 1)^T$ , 反理想序列为  $\mathbf{r}_j^- = (0, \dots, 0)^T$ , 加权因子  $\mathbf{K}_n = (k_1, \dots, k_n)^T$ , 则第  $j$  个备择系统的指标标准化序列与理想、反理想序列的加权距离平方分别为  $D_{j+}^2 = \sum_{i=1}^n k_i^2 (r_{ij} - 1)^2$ ,

$$D_{j-}^2 = \sum_{i=1}^n k_i^2 (r_{ij} - 0)^2.$$

TOPSIS 的核心思想:通过一组最优权重  $\mathbf{K}_n$ , 使指标标准化序列距理想点的加权距离最近,距反理想点的加权距离最远。在求得这两种欧式距离的基础上,比较负向距离与总距离的相对大小,实现方法的优选。因此,首先需要构造优化问题:

$$\left. \begin{aligned} & \text{Min} \sum_{j=1}^m D_{j+}^2 - D_{j-}^2, \\ & \text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^n k_i = 1, \\ & k_i > 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

通过非线性优化求解得到  $\mathbf{K}_n$ , 进而可得  $D_{j+}, D_{j-}$ 。  $\mathbf{K}_n$  可视为使所有权重序列保持最优特性的宏观调和因子,在该因子修正下,不同权重序列到双基点的加权欧式距离不同,但从总体上看却是最优的。  $\mathbf{K}_n$  的引入使得正、负距离不只拘泥于相对评价价值  $r_{ij}$  的大小,而且受到来自整体的调控,因此客观分析过程是建立在权重整体分布基础之上的。换言之,某权重序列的优选度不光取决于其自身与基点的正、负距离,还与专家意见的总

体分布有关. 只有在最优权重  $\mathbf{K}_n$  的调和下达到最小距离, 才能满足 TOPSIS 的要求.

取优选度  $U_j$  作为指标排序的依据,  $U_j$  越大, 指标序列距理想点越近的同时距反理想点越远, 将  $U_j$  按从大到小的顺序排列, 即可得出最优决策方案.

$$U_j = \frac{D_{j-}}{D_{j+} + D_{j-}}. \quad (2)$$

由上述求解过程可以看出, 与利用单基点分析相比, 双基点分析避免了在优化求解过程中超空间存在正反两个点到基点的距离相同的情形, 因此所得的最优解是唯一的.

传统的 TOPSIS 多用于物理量序列的评估优选, 还未见针对权重序列优选的相关研究. 若基于标准化后的权重序列构造优化问题的距离函数, 将弱化权重的绝对量值大小, 很可能脱离人类对实际问题的先验认知, 出现客观赋权法普遍存在的问题. 因此, TOPSIS 必须和主观赋权法结合使用, 才能保证赋权结果的准确合理.

### 3 综合赋权

TOPSIS 是一种针对物理量序列的分析方法, 而权重是各指标相对目标重要程度的定量描述, 与物理量的内涵截然不同, 因此需要对原方法进行改进. 将  $m$  位专家意见(权重序列)视为  $m$  个备择系统, 系统中的元素均为 AHP 所得主观权重. 利用 TOPSIS 解得客观可信度修正主观权重, 再将修正结果作为正基点重新构造优化问题求解并循环此过程, 直到前后两次权重序列误差达到可接受水平, 此时正基点即为最优权重序列.

#### 3.1 权重序列的标准化

指标类型不同, 标准化的方法也不同. 结合实际特征来看, 指标权值无疑具有“越接近理想值  $w_i^*$  越好”的特点, 其标准化方法:

$$r_{ij} = 1 - \frac{|w_{ij} - w_i^*|}{\max |w_{ij} - w_i^*|}. \quad (3)$$

其中:  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; w_{ij}$  为第  $j$  个专家对第  $i$  个指标给出的主观权重,  $w_i^*$  为第  $i$  个指标权重的理想值, 在其真值未知的情况下, 暂取为专家主观权重的均值<sup>[13]</sup>;  $r_{ij}$  为  $w_{ij}$  经标准化后得到的相对评价价值.

#### 3.2 优化求解

由式(3)可以看出, 权值越接近理想值  $w_i^*$ , 其标准化后的结果越接近于 1, 对应的评价价值也就越高. 将理想序列设为  $(1, \dots, 1)^T$ , 反理想序列

设为  $(0, \dots, 0)^T$ , 根据 TOPSIS 中加权距离最优的思想构造优化问题:

$$\left. \begin{aligned} & \text{Min } \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n k_i^2 ((r_{ij} - 1)^2 - (r_{ij} - 0)^2), \\ & \text{s. t. } \sum_{i=1}^n k_i = 1, k_i > 0. \end{aligned} \right\} (4)$$

通过对上述非线性规划问题求解可以得到  $\mathbf{K}_n$ , 进而求得各指标序列与理想点、反理想点的加权距离  $D_{j+}$  和  $D_{j-}$ . 其中,  $\mathbf{K}_n$  可视为使所有权重序列保持最优特性的宏观调和因子, 在该因子修正下, 不同权重序列到双基点的加权欧式距离不同, 但从总体上看却是最优的.  $\mathbf{K}_n$  的引入使得正、负距离不只拘泥于相对评价价值  $r_{ij}$  的大小, 而且受到来自整体的调控.

优选度指标  $U_j$  反映了在调和因子  $\mathbf{K}_n$  的调控下, 序列  $j$  与正基点、反基点间的接近程度. 优选度越大, 指标序列  $j$  离正基点越近的同时离反基点越远, 其可信度相应越高. 将  $U_j$  标准化, 可得到各专家权重的可信度  $w'_j$ .

$$w'_j = \frac{U_j}{\sum_{j=1}^m U_j}. \quad (5)$$

由上述  $w'_j$  的求解过程可以看出, 所构造的优化问题及其求解过程完全基于标准化评价价值  $r_{ij}$ , 因此方法实质上仍然是客观的、内部的. 可信度  $w'_j$  实际上反映了权重序列的内在规律, 将其与主观权重序列  $j$  综合, 才能得出合理可靠的群决策结果.

#### 3.3 群决策

可信度反映了决策主体将某权重序列作为最终权重序列的可信程度, 设 AHP 权重矩阵为  $\mathbf{W} =$

$$\begin{pmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nm} \end{pmatrix} \quad (\text{下标含义同 3.1 节}), \text{可信度序}$$

列为  $\mathbf{W}' = (w'_1, \dots, w'_m)$ , 则群决策权重为

$$\mathbf{W}' \times \mathbf{W}^T. \quad (6)$$

#### 3.4 迭代求解

以群决策权重  $\mathbf{W}' \times \mathbf{W}^T$  为正基点  $\mathbf{W}^*$ , 按 3.1 ~ 3.3 节所述重新构造优化问题并求解, 计算前后两次群决策权重的平均差值  $\bar{D}$ . 在大量试算的同时, 考虑到计算效率和评估需求, 认为当  $\bar{D} < 0.001$  时, 最后一次权重迭代结果即为最优权重.

$$\bar{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i - \omega'_i)^2}{n}}. \quad (7)$$

## 4 实例验证

斜拉桥是一种复杂的缆索承重体系桥梁,基于多指标融合的桥梁评估为掌握其安全状态、制定管养措施提供了便捷.然而,表 1 中除附属设施以外,其他构件的权重差异较大,难以保证加权评估结果的可靠性.现阶段在人类认知有限、主观上不足以准确赋权的情形下,通过 TOPSIS 挖掘权重序列内在联系,对主观权重进行修正和调控,不失为提高评估合理性的一种有效手段.

表 1 斜拉桥构件权重

Table 1 Weight of cable-stayed bridge component

来源	权重序列
文献[5]	(0.301, 0.187, 0.225, 0.184, 0.102)
文献[14]	(0.24, 0.21, 0.20, 0.28, 0.07)
文献[15]	(0.312, 0.221, 0.242, 0.201, 0.024)
假设	(0.17, 0.28, 0.12, 0.41, 0.02)

注:权重序列与构件的对应关系为(斜拉索,主梁,索塔,下部结构,附属设施),后文均与之相同.

### 4.1 综合赋权

以表 1 为例,取主观权重均值为初始正基点  $W^* = (0.256, 0.225, 0.197, 0.268, 0.054)^T$ . 将  $W^*$  与表 1 中的权向量分别代入式(3)进行标准化,可得相对评价价值矩阵  $R$ .

对式(4)非线性规划问题为提高效率,直接使用 Matlab 求解,各组专家权重序列距正基点、反基点的最优加权距离见表 2.

表 2 专家序列加权距离

Table 2 Weighted distance of expert sequences

距离	文献[5]	文献[14]	文献[15]	假设
$D^+$	0.305 5	0.096 3	0.241 4	0.421 6
$D^-$	0.184 8	0.368 2	0.243 6	0.062 4

把  $D^+, D^-$  代入式(2)、式(5)可得各专家权重序列的可信度  $w'_j$ ,进而通过式(6)得到群决策权重(0.268, 0.213, 0.211, 0.247, 0.061),此时依式(7)得  $\bar{D} = 0.006 3$ ,不满足精度要求.以此权重序列为正基点,重新构造优化问题,此时  $W^* = (0.268, 0.213, 0.211, 0.247, 0.061)$ .经 4 次迭代求解发现,当  $W^* = (0.282, 0.206, 0.221, 0.225, 0.066)$  时,  $\bar{D} < 0.001$ ,因此,取此时的群决策权重作为最优权重.

### 4.2 权重比较

依据我国公路桥梁技术状况评定标准(JTG/T H21—2011)<sup>[16]</sup>中有关规定,可以得到斜拉桥

主要构件权重,数据比较见表 3.

表 3 构件综合权重

Table 3 Component synthesis weight

来源	权重序列
取均值	(0.256, 0.225, 0.197, 0.268, 0.054)
本文	(0.282, 0.206, 0.221, 0.225, 0.066)
规范	(0.174, 0.113, 0.113, 0.400, 0.200)

可见,当少数专家意见的可信度较低时,本方法能弱化这部分意见对群决策结果带来的影响,使最优权重趋向于可信度高的部分,弱化程度取决于某个序列与理想序列的偏差程度,弱化程度最大时序列的可信度为 0,相当于被剔除.

与规范相比,本方法所得桥梁构件权重仍存在差距,但规范更偏重于构件的缺损和病害,因此附属设施的权重较高,这对于安全评估来说是不太合理的.从斜拉桥运维经验来看,本文权重显然更符合实际.

### 4.3 不同初始正基点的影响

由双基点分析过程可知,初始正基点的选取可能对迭代结果造成影响.分别取各专家意见及其两两组合均值作为初始正基点进行迭代(共 10 种),最终综合权重见表 4.可见,初始正基点的选取对最优权重几乎不存在影响,仅影响迭代收敛次数.

表 4 不同初始正基点迭代结果及迭代次数

Table 4 Iteration results and times of different  $W_i^*$

初始 $W_i^*$	权重序列	次数
①	(0.282, 0.206, 0.221, 0.224, 0.067)	4
②	(0.282, 0.206, 0.221, 0.224, 0.067)	4
③	(0.282, 0.206, 0.221, 0.225, 0.066)	5
④	(0.282, 0.206, 0.221, 0.225, 0.066)	8
①+②	(0.282, 0.206, 0.221, 0.224, 0.067)	4
①+③	(0.282, 0.206, 0.221, 0.224, 0.067)	4
①+④	(0.282, 0.206, 0.221, 0.225, 0.066)	4
②+③	(0.282, 0.206, 0.221, 0.225, 0.066)	4
②+④	(0.282, 0.206, 0.221, 0.225, 0.066)	7
③+④	(0.282, 0.206, 0.221, 0.225, 0.066)	6

注:①~④分别为表 1 中的四种权重序列.

从理论上讲,在某一固定的专家权重分布下,最优权重是唯一且确定的.表 4 中无论初始正基点如何变化,经客观修正后的综合权重逐渐趋于固定的最优权重,这恰好体现出方法的有效性.

需要注意的是,当初始正基点不同时,最初几次迭代结果存在明显差异,若  $\bar{D}$  取值过大,则有

可能导致迭代提前终止,由此导致赋权结果存在差异.为避免该类现象的发生,同时尽可能地减少迭代次数,建议 $[\bar{D}]$ 取为0.001,并取权重均值作为初始正基点.

## 5 结 论

1) 在专家主观赋权的基础上,通过TOPSIS构造优化问题,并利用解得的可信度修正主观权重序列.所提方法不仅适用于修正AHP权重,对任何主观赋权结果,均可以使用本方法进行修正,具有显著适用性.

2) 以斜拉桥安全评估中主要构件的赋权为例,验证了可信度 $w'_i$ 可以弱化偏差较大的权重对最终群决策结果的影响,并且最终结果不因初始正基点不同而改变.

### 参考文献:

- [1] Sadeghi M, Ameli A. An AHP decision making method for optimal allocation of energy subsidy among socio-economic subsectors in Iran[J]. *Energy Policy*, 2012, 45(6): 24–32.
- [2] Sironen S, Leskinen P, Kangas A, et al. Variation of preference inconsistency when applying ratio and interval scale pairwise comparison [J]. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2014, 21(3/4): 183–195.
- [3] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method [J]. *Computers & Operations Research*, 1995, 22(7): 763–770.
- [4] Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluation indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1020–1023.
- [5] 屈兵,肖汝诚,仲健,等.基于群决策的改进AHP法在桥梁评估中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(11): 4204–4210.  
(Qu Bing, Xiao Ru-cheng, Zhong Jian, et al. Application of improved AHP and group decision theory in bridge assessment[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(11): 4204–4210.)
- [6] Ishizaka A, Balkenborg D, Kaplan T. Influence of aggregation and measurement scale on ranking a compromise alternative in AHP [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2011, 62(4): 700–710.
- [7] Dong Y C, Zhang G Q, Hong W C, et al. Consensus models for AHP group decision making under row geometric mean prioritization method [J]. *Decision Support Systems*, 2010, 49(3): 281–289.
- [8] Pedrycz W, Song M. Analytic hierarchy process in group decision making and its optimization with an allocation of information granularity [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, 19(3): 527–539.
- [9] Alam S, Ghosh S. Ranking by AHP: a rough approach [C]// ISIF. Annapolis, 2002: 185–190.
- [10] Lin L, Wang C. On consistent and ranking of alternatives in uncertain AHP [J]. *Nature Science*, 2012, 4(5): 9–10.
- [11] Bai H B, Wang N C. Research on the selection of scale in AHP [C]// The 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE). Chengdu: IEEE, 2010: 108–111.
- [12] 汪送,王瑛,战仁军,等.航空装备研制风险的综合赋权—双基点法评估[J].中国安全科学学报,2010,20(11): 124–129.  
(Wang Song, Wang Ying, Zhan Ren-jun, et al. Risk assessment of aviation equipment development based on combination weighting and double base points method [J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(11): 124–129.)
- [13] Liu X L, Huang Q, Ren Y, et al. Extraction of cable forces due to dead load in cable-stayed bridges under random vehicle loads [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2015, 31(3): 407–411.
- [14] 刘小玲,黄侨,任远,等.基于群组AHP的斜拉桥评估指标权重研究[J].公路交通科技,2017,34(6): 79–84.  
(Liu Xiao-ling, Huang Qiao, Ren Yuan, et al. Study on index weight in cable-stayed bridge evaluation based on group-AHP [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(6): 79–84.)
- [15] 崔龙.基于甬江特大桥的桥梁健康状态模糊综合评估[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013: 16–22.  
(Cui Long. Research on the fuzz assessment of bridge based on the Yongjiang bridge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 16–22.)
- [16] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T H21—2011 公路桥梁技术状况评定标准[S].北京:人民交通出版社,2011.  
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T H21—2011 standards for technical condition evaluation of highway bridges [S]. Beijing: China Communication Press, 2011.)