

文章编号: 1674-599X(2021)04-0008-06

基于 AHP-熵权法的轨道工程评价指标赋权研究

丁正祥¹, 欧雪峰², 罗鑫², 周亮², 屈星²

(1.浙江省交通工程管理中心, 浙江 杭州 311215; 2.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对铁路与城际轨道品质工程评价指标综合权重难以量化的问题, 以浙江省杭衢高速铁路为例, 构建铁路与城际轨道品质工程评价指标体系, 采用基于五标度法的 AHP-熵权的合赋权法, 选取 3 组特色指标作为研究对象, 对该方法的实用性与可靠度进行验证。研究结果表明: 在工程质量、运营安全和便民服务 3 项特色指标中, 工程质量权重最高, 占 3 项指标总权重的 80% 左右, 符合品质工程的基本要求, 验证了本方法能合理分配地方铁路和城际轨道品质工程各项评价指标的权重, 可为轨道交通品质工程评价体系建设提供理论指导。

关键词: 品质工程; 地方铁路; 城际轨道; 组合赋权法

中图分类号: U213.2

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.002

Research on the weighting index of quality engineering based on the AHP- entropy weight method

DING Zheng-xiang¹, OU Xue-feng², LUO Xin², ZHOU Liang², QU Xing²

(1.Zhejiang Traffic Engineering Management Center, Hangzhou 311215, China;

2.School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: As the comprehensive weight of evaluation index of quality engineering of railway and intercity rail was difficult to quantify, the evaluation index system was established according to the project of the Hangzhou-Quzhou high-speed railway in Zhejiang province. The AHP-Entropy method based on the five-scale was adopted to calculate the weight. Three characteristic indexes of the system were selected as the object to verify the method on practicability and reliability. The research results indicate that the weight of quality of engineering is maximum, the value is about 80% of the total weight of three characteristic indexes. Which meets the basic requirements of quality engineering. This study reveals that the AHP-Entropy method can be employed to analyze the weight of various indexes in quality engineering. Thus, the research results in this paper can be regarded as theoretical guidance for the rail quality engineering evaluation system.

Key words: quality engineering; local railway; intercity railway; combination weighting method

目前, 中国正在大力推进品质工程建设^[1], 地方铁路和城际轨道兼具干线铁路和城市轨道交通的功能与特征, 是促进区域经济发展的关键性工程。品质工程综合评价体系的构建是推动地方铁路和城际轨道品质工程发展的重要环节, 如何科学合理地为各项指标分配权重成为主要研究课题。

蒋叶等人^[2]创建了基于层次分析和模糊综合评价法的风险评估模型, 能够较好地评估指标权重。霍晓波等人^[3-4]基于熵权法分别在风力发电工程建设和城市道路交通领域建立了综合评价模型, 并运用物元可拓综合评价方法进行评价。张立宁等人^[5]在研究建筑工程评价体系中关注到人工神经网络

收稿日期: 2021-01-29

项目基金: 湖南省教育厅优秀青年项目(19B031)

作者简介: 丁正祥(1967—), 男, 浙江省交通工程管理中心教授级高工。

评价方法的不足, 为此引入遗传算法, 优化建筑工程质量评价方法, 使得评价过程和结果更科学合理。这些方法的应用在很大程度上推动了中国工程建设的发展, 但其结果相对单一, 不适用于高自由度、高复杂度的轨道交通建设工程的综合评价。张宇^[9]结合铁路设计、施工、运营各阶段的特点, 基于灰色理论和突变理论对新建崇礼铁路进行了绿色评价。部分学者提出了基于层次分析法(analytic hierarchy process, 简称为AHP)和熵权法的组合方法, 解决了指标权重难以系统量化的问题, 并有效应用于实际工程, 获得了合理的工程评价结果^[7-9]。宋光兴等人^[10]针对现有主观赋权法和客观赋权法的不足, 提出了一种基于决策者偏好(AHP法)及赋权法一致性(Spearman等级相关系数)的组合赋权法。组合方法的提出为工程评价方法提供了新思路, 有效解决了评价结果片面单一的问题, 广泛应用于复杂评价指标体系的构建。目前, 地方铁路与城际轨道品质工程评价指标体系建设仍是空白, 在轨道交通建设日趋精细化、品质化的大背景下, 如何为品质工程匹配合理的评价方法是亟待解决的问题。因此, 本研究拟以地方铁路与城际轨道建设为研究对象, 深入探讨地方铁路与城际轨道品质工程评价指标赋权方法的构建, 为充分挖掘品质工程的内在潜力提供依据。鉴于地方铁路与城际轨道品质工程评价指标覆盖面广, 因此, 以工学理论为准则的客观指标和以工程经验为依据的主观指标共存, 以期为地方铁路与城际轨道品质工程评价各项指标权重分配提供依据。

1 赋权方法的构建

1.1 评价方法的比选

地方铁路和城际轨道交通是组成综合交通体系的重要组成部分, 具有区域性、经济性、政策导向等特性, 其评价体系相对复杂, 涉及工程技术、线路规划、施工建造、运营成本等多个方面。鉴于地方铁路与城际轨道品质工程评价指标体系不仅有明确的层级划分, 而且指标数量多, 与AHP法所适用的具有分层交错评价指标且目标值难以量化的目标系统相匹配。AHP法是一种融合

专家经验和主观判断的赋权方法, 能为工程评价体系提供符合工程实际的指导, 所以本研究采用AHP法为评价指标分配主观权重。同时, 品质工程评价涉及工程设计、工程质量等指标, 需结合相关工程数据进行评价, 熵权法可基于这些数据为指标提供科学客观的权重, 是构建综合指标评价体系最为理想的客观赋权法。此外, 地方铁路与城际轨道品质工程的评价指标覆盖范围广, 组合不同赋权方法时, 需要考虑不同类型指标的相对权重, 避免组合权重结果的主观偏向性, 而乘法组合原理能根据指标相对权重合理分配主客观权重所占的比重, 具有较好的协调性能。因此, 本研究采用基于五标度法的AHP-熵权法组合赋权法, 通过熵权法得到评价专家意见, 根据优劣专家自身权重, 以乘法组合原则加权融合, 确定指标组合权重。

1.2 基于五标度法的AHP法

层次分析法^[11]可针对复杂多目标决策问题, 通过定性指标模糊量化方法, 算出层次单排序和总排序, 得到目标权重向量的系统方法。传统的层次分析法在构造判断矩阵时一般采用1~9作为标度, 九标度法判断标准较密集, 评价结果接近真实情况, 但密集的判断标度会导致差异性不明显且操作难度大, 不宜用于评价指标数目庞大的地方铁路与城际轨道评价体系。因此, 考虑到精确度与可操作性, 本研究采用以-2~2为标度的五标度法^[12]来构造判断矩阵, 五标度法在实施方式上相对简单, 便于大型项目的数据采集, 该方法构造的判断矩阵较真实, 可为后期计算指标权重提供可靠的原始数据。

1.3 熵权法

熵是系统无序程度的一个度量, 熵值的大小反映了指标的离散程度, 而指标相对于系统的离散程度可量化为对系统的影响程度(即权重), 熵权法^[13]由此产生。熵权法是一种客观赋权方法, 它取决于指标本身所具有的属性熵值^[14]。通过参照熵值对指标进行整理排序, 并作归一化处理, 基于不同系统中指标的离散程度, 可计算各指标的系统熵值与相对权重。因此, 可利用指标熵值计算出各个指标的权重, 为地方铁路与城际轨道品质工程多指标综合评价提供客观理论依据。

本研究以 m 个相关专家对 n 个指标进行评价为例, 简述指标熵权的计算步骤:

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

$$p_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^m r_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}). \quad (3)$$

$$w_i'' = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^n (1 - e_i). \quad (4)$$

式中: R 为参考熵权矩阵; p_{ij} 为参照熵权矩阵归一化的元素比重; e_i 为指标系统熵值; w_i'' 为指标客观权重; k 为调和参数 $k = 1/\ln m$, 此处下标 i 和 j 分别为指标排序和专家排序。

2 实例分析

选取浙江省杭衢高速铁路(建衢段)为实例进行研究, 建衢段主线全长 130 km, 双线并行, 采用重型轨道结构, 沿途 5 座站点, 最大时速为 350 km/h, 最大坡度 20‰。全线配套设有九景衢铁路航埠线路所联络线和江山联络线, 运输组织采用本线列车与跨线列车共线运行模式, 全天运营时间为 18 h。杭衢高速铁路兼具地方铁路与城际轨道的特点, 本研究以工程质量、运营安全、便民服务 3 项地方铁路与城际轨道相关特色指标及其下设的 11 项二级指标为例, 分析 AHP-熵权法组合赋权法在地方铁路与城际轨道品质工程评价体系中的适用性。工程质量包含设计和施工过程质量、服役能力、各阶段风险预防与管理制度等方面, 基于此构建了 B1~B4 二级指标。运营安全指标涉及工程服役运营管理和内外部环境调控, 从 3 个方

面设置了 B5~B8 二级指标。此外, 便民服务主要反映服务人员、设施、人性化等方面的配置, 属于特色文化指标, 分别设立了 B9~B11 二级指标。具体指标体系结构如图 1 所示。

2.1 AHP 法确定主客观权重

选取地方铁路与城际轨道品质工程评价指标体系中 3 项特色指标, 依据五标度 AHP 法计算各指标主观权重, 权重计算具体步骤如下:

依据专家对各指标的重要性评价进行打分, 得到比较判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} r_i - r_j + 1, & r_i \geq r_j; \\ [r_j - r_i + 1]^{-1}, & r_i < r_j, i, j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

$$w_i' = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j}, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

式中: a_{ij} 为比较判断矩阵 A 的元素; r_i (或 r_j) 为比较判断矩阵 A 中各元素的重要性排序指数; B 为变换后的判断矩阵; b_{ij} 为判断矩阵 B 的元素; \bar{w}_j 为 b_{ij} (即被比较元素的相对权重); w_i' 为该层级指标在本层中的权重向量, 此处下标 i 和 j 表示不同的指标排序。

利用判断矩阵最大特征根 λ_{max} 对判断矩阵进行一致性检验, 其步骤为:

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{B_i \bar{w}_i}{n w_j}, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}. \quad (12)$$

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (13)$$

式中: B_i 为判断矩阵 B 的第 i 行向量; n 为判断矩阵的阶数; CI 为一致性指标; CR 为一致性比率; RI 为平均随机一致性指标, RI 取值见表 1。

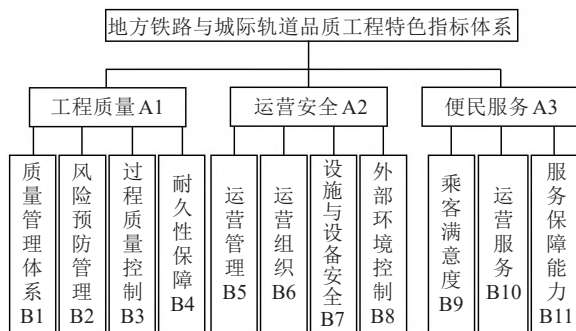


图1 地方铁路与城际轨道品质工程特色指标体系

Fig. 1 Characteristic index system of local railway and intercity rail quality engineering

当 $CR < 0.1$ 时, 可以认为层次单排序的结构有满意的一致性。

表1 RI取值表

Table 1 Values of the RI

n	1	2	3	4	5	6
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24
n	7	8	9	10	11	12
RI	1.32	1.41	1.45	1.49	1.52	1.54

经过专家自上而下逐层对特色指标重要程度打分, 可得各层级指标初始比较判断矩阵 A , 见表2。

表2 一级指标层比较判断矩阵 A

Table 2 Comparison judgment matrix A of the first-level index layer

一级指标层	A1	A2	A3
A1	0	1	2
A2	-1	0	1
A3	-2	-1	0

将五标度法准则下所得比较判断矩阵 A 转化为九标度法准则下的判断矩阵 B 为:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 1/4 & 1 & 4 \\ 1/7 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

由式(5)~(13)计算可得, 最大特征值 $\lambda_{\max}=3.076$, $CI=0.038$, $RI=0.58$, $CR=0.066 < 0.1$, 满足一致性检验, 则一级指标层中各指标的权重向量 $w'=(0.695, 0.230, 0.075)^T$ 。

各二级指标相对于所属一级指标的相对权重, 计算结果见表3。

2.2 熵权法确定客观权重

本研究通过统计11位行业内专家对11个二级指标进行初始评价, 得到参考熵权矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 2 & 6 & 1 & 5 & 8 & 11 & 9 & 3 & 7 & 10 & 4 \\ 3 & 5 & 2 & 4 & 10 & 9 & 11 & 6 & 7 & 8 & 1 \\ 3 & 1 & 5 & 6 & 2 & 10 & 8 & 11 & 9 & 7 & 4 \\ 1 & 6 & 4 & 3 & 5 & 9 & 7 & 10 & 8 & 11 & 2 \\ 1 & 3 & 2 & 4 & 6 & 10 & 9 & 11 & 8 & 7 & 5 \\ 2 & 3 & 1 & 6 & 8 & 10 & 9 & 11 & 4 & 7 & 5 \\ 4 & 5 & 3 & 1 & 8 & 3 & 2 & 7 & 10 & 11 & 9 \\ 4 & 1 & 2 & 3 & 10 & 9 & 7 & 5 & 11 & 8 & 6 \\ 6 & 5 & 3 & 4 & 2 & 8 & 9 & 10 & 7 & 11 & 1 \\ 2 & 11 & 3 & 1 & 10 & 4 & 8 & 9 & 7 & 5 & 6 \\ 6 & 4 & 5 & 2 & 1 & 3 & 9 & 10 & 8 & 7 & 11 \end{bmatrix}$$

结合公式(1)~(4), 可得11个二级指标相对于整个体系的客观权重, 其结果见表4。

表3 二级指标层主观权重计算表

Table 3 Calculation table of subjective weight of the second-level index layer

二级指标层	判断矩阵 B	一致性检验	相对权重	权重 w_i'
B1	$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 9 & 6 \\ 1/4 & 1 & 6 & 3 \\ 1/9 & 1/6 & 1 & 1/4 \\ 1/6 & 1/3 & 4 & 1 \end{bmatrix}$	$\lambda_{\max}=4.052$ $CI=0.017$ $CR=0.019 < 0.1$	0.203	0.141
B2			0.329	0.229
B3			0.175	0.122
B4			0.293	0.204
B5	$\begin{bmatrix} 1 & 6 & 4 & 1 \\ 1/6 & 1 & 1/3 & 1/6 \\ 1/4 & 3 & 1 & 1/4 \\ 1 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}$	$\lambda_{\max}=4.18$ $CI=0.06$ $CR=0.067 < 0.1$	0.188	0.043
B6			0.261	0.060
B7			0.176	0.040
B8			0.375	0.086
B9	$\begin{bmatrix} 1 & 1/7 & 1/4 \\ 7 & 1 & 4 \\ 4 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$	$\lambda_{\max}=3.011$ $CI=0.005$ $CR=0.009 < 0.1$	0.391	0.029
B10			0.269	0.020
B11			0.34	0.026

表4 二级指标层客观权重计算表

Table 4 Calculation table of objective weight of the second-level index layer

二级指标层	$\sum_{j=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij})$	k	第 i 个指标的熵值 e_i	权重 w_i''
B1	-1.502	0.417	0.626	0.162
B2	-1.899	0.417	0.792	0.090
B3	-1.427	0.417	0.595	0.175
B4	-1.655	0.417	0.690	0.134
B5	-2.314	0.417	0.965	0.015
B6	-2.756	0.417	1.149	0.064
B7	-2.751	0.417	1.147	0.064
B8	-2.817	0.417	1.175	0.076
B9	-2.745	0.417	1.145	0.063
B10	-2.841	0.417	1.185	0.080
B11	-1.970	0.417	0.822	0.077

2.3 乘法组合权重

根据得到的AHP主观权重和熵权法客观权重, 按照乘法组合赋权法计算评价指标体系的综合权重。基于乘法组合计算指标综合权重公式为:

$$w_i = \frac{w_i' w_i''}{\sum_{i=1}^n w_i' w_i''} \quad (14)$$

式中: w_i 为指标的综合权重; n 为评价指标的个数; w_i' 为AHP各个指标的主观权重; w_i'' 为熵权法各个指标的客观权重。

根据表3~4的结果,由式(14)计算指标综合权重 w_i ,其结果见表5。

表5 基于AHP-熵权组合赋权法的综合权重表

Table 5 Comprehensive weight table based on the AHP-entropy combination weighting method

一级指标	综合权重	二级指标	综合权重
工程质量 A1	0.828	质量管理体系 B1	0.205
		风险预防管理 B2	0.185
		过程质量控制 B3	0.192
		耐久性保障 B4	0.246
运营安全 A2	0.123	运营管理 B5	0.006
		运营组织 B6	0.035
		设施与设备安全 B7	0.023
		外部环境控制 B8	0.059
便民服务 A3	0.049	乘客满意度 B9	0.017
		运营服务 B10	0.014
		服务保障能力 B11	0.018

工程质量是工程整体进度与发展的重要指标,相对于运营安全和便民服务而言,它是品质工程建设的基础控制环节。由表5可知,一级指标中,工程质量所占权重为0.828,明显高于运营安全和便民服务,符合品质工程的本质要求。二级指标中,质量管理体系和耐久性保障是反映工程建设及服役全过程的关键性指标,权重占比接近50%,说明品质工程建设并非单一阶段评估项目,而是设计、施工、服役、养护等全周期管理评价,也从侧面体现了品质工程中的全局建设理念。

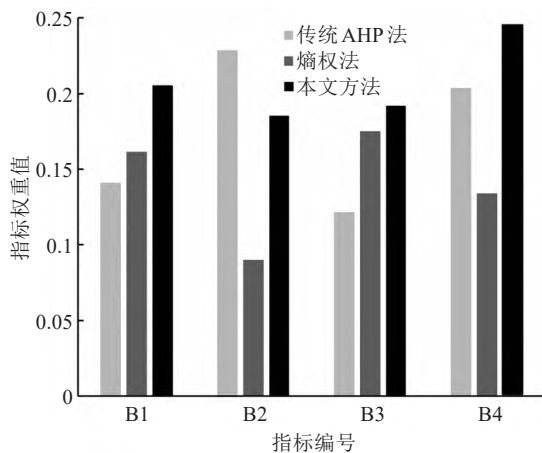


图2 工程质量下设二级指标权重值

Fig. 2 Weights of second-level indexes of engineering quality

工程质量下设的4项二级指标通过运用不同方法计算的权重值如图2所示。从图2中可以看出,

相较于单一权重计算方法,本研究采用的基于五标度AHP-熵权法组合赋权法融合了主客观数据,在权重分配上更加均衡合理。除B2指标外,其余指标权重值均高于单一方法计算结果。表明:该方法在工程质量方面的评估较为保守,充分考虑了工程安全要素,能够有效地应用于品质工程评价体系。

3 结论

1) 采用基于五标度法的AHP-熵权法组合赋权法,以浙江省杭衢高速铁路(建衢段)为例,研究了地方铁路与城际轨道评价指标体系的权重分配并进行了验证。评价结果表明,地方铁路与城际轨道品质工程特色指标中,工程质量影响较大,运营安全和便民服务影响较小。工程质量是工程整体进度与发展的重要指标,相对于运营安全和便民服务而言,它是品质工程建设的基础控制环节。因此,工程质量具有较高的权重比例,符合品质工程本质要求,证明了该方法的有效性和实用性。

2) 城市交通环境复杂,地方铁路与城际轨道评价体系涉及面广,指标数量庞大,本研究仅对其部分内容进行探讨,并将基于五标度法的AHP-熵权法组合赋权法成功应用于地方铁路与城际轨道品质工程评价体系。该方法的计算结果为品质工程评价提供了真实可行的指标权重,有效解决了当前地方铁路与城际轨道工程中出现的多指标评价片面单一问题,为品质工程特色指标的融合奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] 黄勇. 顺应发展新需要 践行五大发展理念——《关于打造公路水运品质工程指导意见》的解读[J]. 中国公路, 2017(6): 40-42. (HUANG Yong. Following the new development needs and practicing five development concepts - interpretation of the guidance on building quality engineering of highway water transport[J]. China Highway, 2017(6):40-42.(in Chinese))
- [2] 蒋叶, 李士宣. 基于AHP和模糊综合评价法的公路施工安全风险评估[J]. 河北工业大学学报, 2020, 49(4): 83-88. (JIANG Ye, LI Shi-xuan. Safety risk assessment of

- highway construction based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2020,49(4):83-88.(in Chinese))
- [3] 霍晓波. 风电工程建设项目施工阶段质量评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013. (HUO Xiao-bo. The study on quality evaluation of wind power project construction stage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013. (in Chinese))
- [4] 谭振超, 成卫, 许世春. 基于熵权的道路交通状态模糊综合评判模型[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(3): 69-74, 81. (TAN Zhen-chao, CHENG Wei, XU Shi-chun. A fuzzy comprehensive evaluation model of road traffic state based on entropy weight[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(3): 69-74, 81. (in Chinese))
- [5] 张立宁, 安晶, 何燕. 基于GA-ANN的建筑工程质量评价模型研究[J]. 华北科技学院学报, 2011, 8(1): 50-53. (ZHANG Li-ning, AN Jing, HE Yan. Study on the evaluation model for construction project quality based on GA-ANN[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2011, 8(1): 50-53.(in Chinese))
- [6] 张宇. 高速铁路绿色评价指标体系及评价结果研究: 以京张高铁崇礼段为例[D]. 北京: 北京交通大学, 2019. (ZHANG Yu. Research on green evaluation index system and evaluation results of high speed railway: taking the Chongli section of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway as an example[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [7] 马静, 戴维佳. 基于AHP-信息熵决策的城市轨道建设期交通组织方案评价[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(4): 101-108. (MA Jing, DAI Wei-jia. Evaluating on traffic management during traffic construction of urban rail based on AHP-information entropy[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2020, 40(4): 101-108.(in Chinese))
- [8] 陈兴博, 靳文舟, 胡坤鹏. 基于AHP-熵权模糊物元的城乡公交一体化评价[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(1): 74-79, 84. (CHEN Xing-bo, JIN Wen-zhou, HU Kun-peng. Evaluation of urban and rural public transport integration based on AHP-entropy method and fuzzy matter element[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(1): 74-79, 84.
- [9] 胡庆国, 蔡孟龙, 何忠明. 基于组合赋权法与集对分析的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(4): 16-26. (HU Qing-guo, CAI Meng-long, HE Zhong-ming. Construction safety risk assessment of prefabricated buildings based on combination weighting method and set pair analysis[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(4): 16-26.(in Chinese))
- [10] 宋光兴, 杨德礼. 基于决策者偏好及赋权法一致性的组合赋权法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(9): 1226-1230, 1290. (SONG Guang-xing, YANG De-li. Combination weighting approach based on the decision-maker's preference and consistency of weighting methods [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(9): 1226-1230, 1290.(in Chinese))
- [11] Saaty T L. How to make a decision: The analytic hierarchy process[J]. Interfaces, 1994, 24(6): 19-43.
- [12] 徐泽水. 层次分析新标度法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(10): 75-78. (XU Ze-shui. A new scale method in analytic hierarchy process[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1998, 18(10): 75-78.
- [13] 王明年, 郭晓晗, 倪光斌, 等. 基于AHP熵权法的铁路隧道单双洞选型决策研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(11): 51-56. (WANG Ming-nian, GUO Xiao-han, NI Guang-bin, et al. Research on the selection of single-tube and double-tube for railway tunnel based on AHP_熵entropy method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(11): 51-56.(in Chinese))
- [14] 刘大海, 宫伟, 邢文秀, 等. 基于AHP-熵权法的海岛海岸带脆弱性评价指标权重综合确定方法[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 462-467. (LIU Da-hai, GONG Wei, XING Wen-xiu, et al. Comprehensive method for determining the weights of vulnerability assessment indexes on Islands and the coastal zone based on the AHP weight method and entropy weight method[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 462-467. (in Chinese))