

刘义艳,郝婷楠,李艳波,等.高速公路自洽能源系统综合能效评估方法[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(5):27-35.

LIU Yi-yan,HAO Ting-nan,LI Yan-bo,et al. Comprehensive energy efficiency evaluation method for expressway self-contained energy systems[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2024,44(5):27-35.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.05.003

# 高速公路自洽能源系统综合能效评估方法

刘义艳,郝婷楠,李艳波,柳柏松

(长安大学 能源与电气工程学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**为了解决高速公路能源系统这种特殊用能场景的评价问题,以层次分析-熵权-准则重要性评估(CRITIC)组合赋权方法为基本评价分析框架,建立高速公路自洽能源系统综合能效评估系统。首先选取高速公路能源系统综合能效为一级评价指标,选取能源性、经济性、可靠性为二级评价指标,选取能源综合利用率、可再生能源占比等 11 个指标为三级评价指标,采用层次分析-熵权-CRITIC 组合赋权方法计算出各三级评价指标权重;然后利用逼近理想解排序法(TOPSIS),通过系统选取的指标到正负理想方案的欧氏距离对 4 个系统进行评价;最后通过层次分析法、熵权法、CRITIC 法以及层次分析-熵权-CRITIC 组合赋权方法对选取的系统进行综合评价。研究结果表明:提出的方法投资运维成本、能源购买成本所占比重较高,而负荷缺电率、停电恢复时长、可再生能源利用率、污染物处理成本几个指标所占比重较低;通过 TOPSIS 法,计算 4 个系统的欧式距离及贴近度,系统 2 的经济性、能源性明显优于其他系统,可靠性与其他系统持平。提出的方法可以充分利用指标数据,弱化主观偏好因素,提高评估结果的客观性,具有较高的科学性及实用性。

**关键词:**道路工程;高速公路能源系统;能效评估;层次分析-熵权-CRITIC 组合赋权法;TOPSIS 法  
**中图分类号:**U411 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2024)05-0027-09

## Comprehensive energy efficiency evaluation method for expressway self-contained energy systems

LIU Yi-yan, HAO Ting-nan, LI Yan-bo, LIU Bai-song

(School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to solve the evaluation problem of the special energy consumption scenario of the highway energy system, the analytic hierarchy process-entropy weight-CRITIC combination weighting method was used as the basic evaluation and analysis framework, and a comprehensive energy efficiency evaluation system for the highway self consistent energy system was established. Firstly, the comprehensive energy efficiency of the highway energy system was selected as the primary evaluation indicator. Energy efficiency, economic viability, and reliability were selected as secondary evaluation indicators, while 11 indicators including the comprehensive energy utilization rate and the proportion of renewable energy were chosen as tertiary evaluation

收稿日期:2024-06-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB1600202);陕西省重点研发计划项目(2021KW-13,2021GY-098)

作者简介:刘义艳(1981-),女,陕西镇安人,副教授,工学博士,E-mail:yyliu1@chd.edu.cn.

通讯作者:李艳波(1980-),男,黑龙江抚远人,副教授,工学博士,E-mail:ybl@chd.edu.cn.

indicators. The combined analytic hierarchy process-entropy weight-CRITIC weighting method was employed to calculate the weights of each tertiary evaluation indicator. Then, the TOPSIS method was used to evaluate the four systems based on the Euclidean distance between the selected indicators and the ideal and negative ideal solutions. Finally, four different systems were comprehensively evaluated using the analytic hierarchy process, entropy method, CRITIC method, and the combination of analytic hierarchy process-entropy weight-CRITIC method. The results show that the evaluation method in this paper assigns a higher weight to investment and operation costs, as well as energy purchasing costs, while placing lower emphasis on indicators such as load shedding rate, power outage recovery time, renewable energy utilization rate, and pollution treatment costs. By applying the TOPSIS method, the Euclidean distance and closeness degree of the four systems are calculated, and system 2 exhibits better economic and energy performance compared to the other systems, while its reliability is on par with the others. The proposed method allows for the full utilization of indicator data, reduces subjective preferences, and improves the objectivity of evaluation results. It demonstrates high scientific and practical value. 7 tabs, 5 figs, 25 refs.

**Key words:** road engineering; highway energy system; energy efficiency evaluation; analytic hierarchy process-entropy weight-CRITIC combination weighting method; TOPSIS method

## 0 引言

高速公路作为交通运输系统的重要组成部分,随着交通运输总量的增长,其能源需求也迅速增长。不同于其他公路运输,高速公路用能设施分布较为分散<sup>[1]</sup>,多分布在电网边缘或人烟稀少的地区,单独架设供电网会增加许多费用,且高速沿线及服务区域拥有大量可利用的可再生能源。因此,充分考虑可再生能源的随机波动性及间歇性特点<sup>[2]</sup>,构建一套多层次、一体化的交通与能源相融合的综合交通能源体系(自治能源系统),来满足交通行业能源需求、提升交通能源系统的自治水平尤为重要。

随着交通运输系统的快速发展,越来越多国内外学者开始研究交通领域的综合评价。翁剑成等提出基于主观层次分析法和客观离差最大化法相结合的组合评价方法,实现对公交专用道效能的量化评估,为公交专用道的精细化设计和科学设置提供重要的方法支撑<sup>[3]</sup>。Cui 等运用了层次分析法(AHP)和熵权法对政府引导基金的政策创新绩效和经济绩效的产出水平进行加权;再运用灰色关联分析的方法,衡量政府引导基金政策与创新绩效和经济绩效之间的关系,并基于研究结果提出相应的策略和建议<sup>[4]</sup>。Topcu 采用熵权法的逼近理想解排序法(TOPSIS),通过 1 990 种不同的气象参数对土耳其东北部卡尔斯站进行干旱分析<sup>[5]</sup>。叶飞等以功能、景观环境、美学作为指标,通过层次分析法验证

了公路隧道洞口设计综合评价体系的合理性,为后续隧道洞口的设计及综合评价提供一定的借鉴和参考<sup>[6]</sup>。Gholami 等提出建筑物电气设备特别是电梯的最佳维护方法,以实现各种效益,并采用模糊层次分析法考虑了专家判断的不确定性<sup>[7]</sup>。Liu 等引入熵权法推导属性权重,以平衡多个属性权重的影响<sup>[8]</sup>。Shi 等在研究保证工人满意度、空气质量和能源效率的供应和返回装置的最佳分配时,采用 AHP、熵权法来计算权重<sup>[9]</sup>。Yuan 等针对电力系统多元化及高弹性建立了考虑弹性、可靠性、经济性以及环境保护性 4 个方面的评价指标体系,并采用熵权-层次分析-TOPSIS 组合评价法对评价指标进行赋权及综合评价<sup>[10]</sup>。Fahmi 基于 TOPSIS 技术定义了多属性群体决策方法,同时还为粒子群优化定义了时频特征法(TFF)-AHP-TOPSIS 技术<sup>[11]</sup>。许增光等运用模糊层次分析法构建指标间的判断矩阵,用最大特征根法求取每个指标的权值,并应用于长深隧洞突涌水灾害等级评价问题,具有重要的科学意义和实用价值<sup>[12]</sup>。Zhou 等在 ACTOR-CRITIC 框架内,采用策略梯度方法来改善控制策略,而对于价值函数,使用随机演算推导出方差减少最小二乘时间差分方法<sup>[13]</sup>。Saxena 等开发了一种基于标准间相关性和标准重要性的评价方法,用 CRITIC 法和 TOPSIS 法的集成技术来选择最佳软件可靠性增长模型(SRGM),通过 CRITIC 方法获得标准的权重,并使用 TOPSIS 方法按顺序对最佳 SRGM 进行

评价<sup>[14]</sup>。Dhara 等通过 CRITIC 法和 TOPSIS 的订单绩效技术来选择兼顾有效性和美观舒适性的公务机<sup>[15]</sup>。

由此可见,目前国内外对于公路系统的综合评价多是针对路面系统,而对于高速公路能源系统这种用能场景的评价研究较为缺乏;同时综合评价在构建系统时仅用主观赋权法,例如层次分析法,或者仅用客观赋权法,例如熵权法等计算权重,缺乏对主观赋权和客观赋权结合的综合方法。因此本文提出了针对高速公路自洽能源系统的综合能效评估方法,构建了层次分析-熵权-CRITIC 组合的赋权方法来计算权重,此方法结合了主观赋权法以及客观赋权法;并用 TOPSIS 法分别对层次分析法、熵权法、CRITIC 法、层次分析-熵权-CRITIC 组合赋权方法进行评价。本文所设计的评价方法能够兼顾主观性和客观性,从而避免所求得各项指标权重出现单一权重过高以及各项指标权重差别过小的问题,提高了科学性及实用性。

1 自洽能源系统综合评价体系

1.1 高速公路微电网建模

本文微电网系统以高速公路场景为应用场景,高速公路沿线具有丰富的空间资源,并且高速公路沿线及隧道负荷又可以对分布式电源所发出的电能进行消纳,从而提高高速公路能源系统的自洽率,降低能源购买量及碳排放量<sup>[16]</sup>。高速公路微电网结构如图 1 所示,其中包含风力发电、光伏发电系统、微型燃气轮机系统、蓄电储能装置及各类负荷。

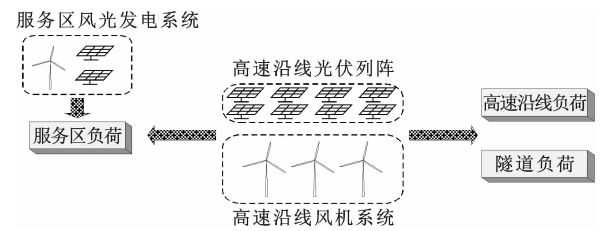


图 1 高速公路微电网结构  
Fig. 1 Structure of highway microgrid

1.2 评价指标选取

评价指标体系应当充分体现所评价对象的特点和性质,这是评价体系建立的基础和前提,而评价指标选取是否合理会对最终评价结果的准确性产生较大影响<sup>[17]</sup>。

因此,所选取的综合评价指标应适用于各种高速公路能源系统中,能够充分地体现各系统之间的差异,且所选取的指标应遵守相同的计算规则,从而

反映不同对象同一指标之间的差别<sup>[18]</sup>。

高速公路自洽能源系统综合水平评价的主要目标为能源性、经济性及可靠性,因此所建立评价指标体系应能够充分体现高速公路的用能情况、经济成本及供电可靠情况。本文所建立自洽能源系统的评估体系以能效性为核心思想,建立了一套考虑能源性、经济性、可靠性 3 个方面的评价指标体系。具体指标如表 1 所示。

表 1 评价指标  
Tab. 1 Evaluation indicators

一级指标	二级指标	三级指标
高速公路能源系统综合能效 A	能源性指标 A <sub>1</sub>	能源综合利用率 A <sub>11</sub>
		可再生能源占比 A <sub>12</sub>
		可再生能源利用率 A <sub>13</sub>
		线路理论损耗率 A <sub>14</sub>
	经济性指标 A <sub>2</sub>	投资运维成本 A <sub>21</sub>
		能源购买成本 A <sub>22</sub>
		单位千米净成本 A <sub>23</sub>
		污染物处理成本 A <sub>24</sub>
	可靠性指标 A <sub>3</sub>	负荷缺电率 A <sub>31</sub>
		高速公路重要设施正常运作率 A <sub>32</sub>
		停电恢复时长 A <sub>33</sub>

1.2.1 能源性指标

能源综合利用率用于反映系统的节能情况,其值越大,说明能源系统的节能性越好;可再生能源占比为可再生能源发电量占系统总发电量的比例;可再生能源利用率为系统弃风电量与弃光电量的关系;线路理论损耗率为通过物理计算所得线路损耗电量占线路总供电量的百分比。

1.2.2 经济性指标

投资运维成本为自洽能源系统的前期投资成本和后期运维成本之和;能源外购成本主要包含能源系统所需燃料购买成本和所需电能购买成本;单位千米净成本指每千米高速公路所花费净年用电成本,为年净用电成本与公路路线长度的比值;污染物处理成本包括系统发电及向大电网购电所产生的污染物处理成本。

1.2.3 可靠性指标

负荷缺电率指标值越小,系统性能越好;高速公路重要设施正常运作率指标值越大,其系统性能越好;系统停电恢复时长定义为系统出现停电事件后,平均恢复供电所需的时长。

其中,能源综合利用率、可再生能源占比、可再生能源利用率、高速公路重要设施正常运作率 4 个指标为正向指标,即其值越大系统性能越优越;

线路理论损耗率、投资运维成本、能源购买成本、单位千米净成本、污染物处理成本、负荷缺电率、停电恢复时长 7 个指标为负向指标,即其值越小系统性能越优。

1.3 评估方法

本文采用主观层次分析法、客观熵权法及改进 CRITIC 法进行组合赋权,消除了单一赋权法的客观性和主观性为评价结果带来的不利因素,较大幅度地提高了高速公路自洽能源系统能效评估的准确性。利用组合赋权法与逼近理想解排序法构建综合评价模型,流程如图 2 所示,对高速公路自洽能源系统进行综合评价。

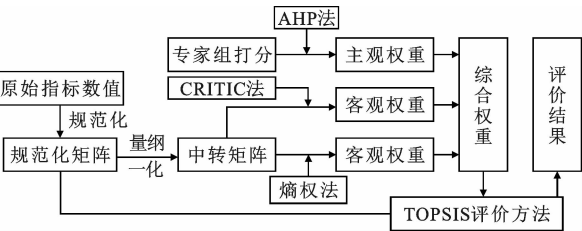


图 2 综合评估模型流程  
Fig. 2 Flow of integrated assessment model

1.3.1 层次分析法

层次分析法将决策者的经验及判断进行量化,并通过对评价指标分层排位,构成一组有序的递阶矩阵,通过分析计算得到最终指标权重。因此,层次分析法适用于结构复杂,且缺乏各指标具体数据的评价体系<sup>[19]</sup>。层次分析法的优点是系统简明且所需数据资料较少,缺点是主观性较强<sup>[20]</sup>,且构造判断矩阵时,决策者很难用一个精确的数值对不同的评价指标做出比较<sup>[21]</sup>。层次分析法流程如图 3 所示。

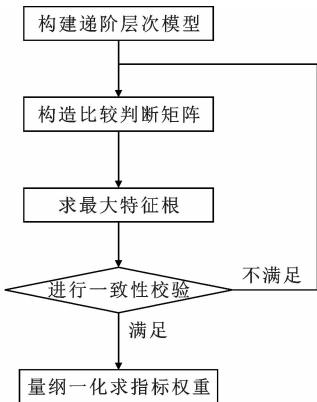


图 3 层次分析法流程  
Fig. 3 Flow of analytic hierarchy procedure

1.3.2 熵权法

熵权法是一种客观赋权方法,它通过对各项指

标变化趋势的分析,运用信息熵的概念求出各项指标的熵值,最后根据所求得熵值求出各项指标的熵权。熵权法的优点是避免人为因素带来的偏差,缺点是忽略决策者主观意图。

熵权法计算指标权重的具体步骤如下:

- ①构造原始评价矩阵。
- ②将原始评价矩阵标准化,  $R = (r_{ij})_{m \times n}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ , 其中  $m$  为评价对象个数,  $n$  为评价指标个数,  $r_{ij}$  为标准化处理之后的结果值。
- ③计算各评价指标熵值  $H_j$ 。
- ④确定各指标权重。根据所求得的各项指标熵值可以计算得到其熵权  $a_j$ , 如下所示

$$a_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}$$

(1)

1.3.3 改进 CRITIC 法

CRITIC 法不仅考虑到评价指标的变异大小,还充分考虑到了评价指标间的冲突性对客观权重的影响<sup>[22]</sup>。但标准差并不能直接体现指标的对比强度,而是通过反映指标变动程度来间接体现,其结果可能存在误差。因此本文采用变异系数法改进的 CRITIC 法,其具体步骤如下:

- ①构造原始评价矩阵。
- ②将原始评价矩阵标准化。
- ③确定各评价指标的变异系数。
- ④计算各评价指标的独立性系数。
- ⑤计算各评价指标的综合性系数  $C_j$ 。
- ⑥计算各评价指标权重  $w_j$ , 即

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}$$

(2)

1.3.4 层次分析-熵权-CRITIC 组合赋权方法

本文通过 Spearman 秩相关系数计算各赋权方法间的平均一致性<sup>[23]</sup>,从而得到各赋权方法的权重,将 3 种赋权方法所得指标权重值进行加权计算得到各指标的组合权重。首先计算任意 2 个赋权方法间的 Spearman 相关系数

$$\alpha_{ab} = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{j=1}^n (\beta_j^a - \beta_j^b)^2$$

(3)

式中:  $\alpha_{ab}$  为赋权方法  $a$  与  $b$  之间的 Spearman 秩相关系数;  $\beta_j^a, \beta_j^b$  分别为赋权方法  $a$  和赋权方法  $b$  中第  $j$  项指标进行排序后的对应值。

将第  $a$  种赋权方法所计算的各指标权重按大小重新排序,得到新的排序向量为  $\beta^a = (\beta_1^a, \beta_2^a, \dots, \beta_n^a)$ , 其中权重最大的指标所对应的值为  $n$ , 以此类

推,权重最小的指标值为1。

再计算赋权方法  $a$  的平均一致性  $\alpha_a$

$$\alpha_a = \frac{1}{m' - 1} \sum_{b=1, b \neq a}^{m'} \alpha_{ab} \quad a = 1, 2, \dots, m' \quad (4)$$

式中:  $m'$  为赋权方法的个数。

最后计算组合权重,所得的平均一致性值对各赋权方法进行加权得到最终各指标的组合权重  $W_j$

$$W_j = \sum_{a=1}^{m'} \lambda_a W'_a \quad (5)$$

$$\lambda_a = \frac{\alpha_a}{\sum_{b=1}^m \alpha_b} \quad (6)$$

式中:  $W'_a$  为第  $a$  种赋权方法所得权重;  $\lambda_a$  为第  $a$  种赋权方法的系数。

## 2 综合评价方法

在计算得到各评价指标权重后,需通过综合评价方法对各待评价系统进行评价。本文选用 TOPSIS 法作为综合评价方法, TOPSIS 法将各系统的评价指标数据进行标准化处理,消除各指标间的量纲差别,并通过各系统指标到正负理想方案的欧氏距离对其进行评价打分<sup>[24]</sup>。TOPSIS 法具体步骤如下<sup>[25]</sup>

(1) 构造原始评价矩阵

若有  $m$  个评价对象,  $n$  个评价指标, 形成评价矩阵  $X$

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (7)$$

(2) 矩阵标准化

将原始评价矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$  中的各评价指标通过向量量纲一化进行标准化处理, 得到标准化矩阵  $D = (d_{ij})_{m \times n}$

$$d_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (8)$$

(3) 通过所计算组合权重, 对标准化后的矩阵进行加权, 得到加权矩阵  $U$

$$U = (u_{ij})_{m \times n} = (W_j d_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(4) 通过分析评价指标体系中各指标的定义, 将指标分为正向指标与负向指标, 并比较各系统的指标值, 确定正理想方案  $U_0^+$  与负理想方案  $U_0^-$ 。

正理想方案  $U_0^+$

$$U_0^+ = \{(\max u_{ij} | j \in J^+), (\min u_{ij} | j \in J^-)\} \\ = \{u_{01}^+, u_{02}^+, \dots, u_{0j}^+, \dots, u_{0n}^+\} \quad (10)$$

负理想方案  $U_0^-$

$$U_0^- = \{(\min u_{ij} | j \in J^+), (\max u_{ij} | j \in J^-)\} \\ = \{u_{01}^-, u_{02}^-, \dots, u_{0j}^-, \dots, u_{0n}^-\} \quad (11)$$

式中:  $J^+$  为正向指标, 即值越大系统越优秀的指标;  $J^-$  为负向指标, 即值越小系统越优秀的指标。

(5) 计算第  $i$  个评价系统到正理想方案与负理想方案的欧氏距离。

到正理想方案的欧氏距离  $D_i^+$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [u_{ij} - u_{0j}^+]^2} \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (12)$$

到负理想方案的欧氏距离  $D_i^-$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [u_{ij} - u_{0j}^-]^2} \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (13)$$

(6) 根据所得到的各系统到正理想方案与负理想方案的欧氏距离, 计算各系统的相对贴近度, 各系统的相对贴近度即可视为系统评分, 依照评分对各系统进行优劣排序, 计算方法如下

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (14)$$

式中:  $C_i^*$  为相对贴近度, 表示各系统与理想方案的接近程度, 取值范围为  $0 \sim 1$ , 越接近 1, 表明系统综合评价结果越好。

## 3 算例及结果分析

### 3.1 算例设计

高速公路的用能场景主要包括高速公路沿线、隧道、收费站、服务区四部分。本文根据用能场景的特点以及高速公路微电网模型, 选取了中国某 4 个高速公路自洽能源系统。这 4 个系统所处地区年均辐射强度为  $1\,500(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^2$ , 平均风速为  $7 \text{ m/s}$ 。根据系统的用能场景, 其负荷为监控负荷、收费系统负荷、隧道照明负荷、隧道风机负荷、充换电负荷以及服务区负荷。再按照上述所设计评价体系对它们进行评价比较, 其参数如表 2 所示。

根据数据可以对 4 个能源系统先进行初步分析, 系统 4 有 5 个指标最佳, 可再生能源占比、能源购买成本、单位千米净成本、污染物处理成本、负荷缺电率; 系统 2 有 4 个指标最佳, 能源综合利用率、可再生能源利用率、线路理论损耗率、投资运维成本; 系统 3 有 2 个指标最佳, 高速重要设施正常运作率、停电恢复时长。综上, 系统 4 表现最佳。

下面将所设计综合评价体系对 4 个系统进一步

表 2 各系统指标参数

Tab. 2 Indicator parameters for each system

指标	系统 1	系统 2	系统 3	系统 4
能源综合利用率/%	90.15	93.37	89.50	91.47
可再生能源占比/%	64.74	61.44	58.95	69.81
可再生能源利用率/%	98.13	99.50	95.29	94.92
线路理论损耗率/%	6.29	4.89	6.45	5.89
投资运维成本/万元	1 476.1	1 104.5	1 921.4	2 005.9
能源购买成本/万元	912.5	992.7	1 016.2	884.7
单位千米净成本/万元	59.08	49.22	55.61	44.27
污染物处理成本/万元	109.2	121.5	146.1	99.4
负荷缺电率/%	0.153 1	0.209 9	0.073 0	0.009 6
高速重要设施正常运作率/%	99.82	99.58	99.99	99.97
停电恢复时长/min	76.21	90.68	52.07	80.30

评价。

3.2 评价过程及结果

3.2.1 计算组合权重

首先通过层次分析法计算主观权重,通过熵权法计算客观权重,通过改进 CRITIC 法计算客观权重。

在层次分析法中,本文进行了专家打分。根据各指标的相对重要程度构建判断矩阵。首先,先构建二级指标的判断矩阵(能源性、经济性、可靠性),进行一致性判断后符合一致性要求,再根据矩阵得出各二级指标权重;然后对二级指标下的三级指标分别构建判断矩阵,进行一致性判断后符合一致性要求,再根据矩阵得出各三级指标权重;最后通过二级指标权重、三级指标权重计算最终评价指标权重。

二级指标的判断矩阵如表 3 所示。对其进行一致性判断得一致性比例  $C_R$  为 0.008 8,符合一致性要求。

表 3 二级指标判断矩阵

Tab. 3 Secondary indicator judgment matrix

评价指标	能源性	经济性	可靠性
能源性	1	1/2	2
经济性	2	1	3
可靠性	1/2	1/3	1

能源性指标、经济性指标、可靠性指标的判断矩阵如表 4~表 6 所示。对其进行一致性判断得一致性比例  $C_R$  分别为 0.017 2、0.044 2、0.008 5,均小于 0.1,符合一致性要求。

熵权法先进行矩阵化,再对矩阵进行量纲一化处理,根据所得到的标准化矩阵计算其矩阵,根据式(1)可计算得到各指标熵值。

改进 CRITIC 法对初始矩阵各值进行标准化得

表 4 能源性指标判断矩阵

Tab. 4 Energy index judgment matrix

评价指标	能源综合利用率	可再生能源占比	可再生能源利用率	线路理论损耗率
能源综合利用率	1	1/2	3	2
可再生能源占比	2	1	4	2
可再生能源利用率	1/3	1/4	1	1/2
线路理论损耗率	1/2	1/2	2	1

表 5 经济性指标判断矩阵

Tab. 5 Economic indicator judgment matrix

评价指标	投资运维成本	能源购买成本	单位公里净成本	污染物处理成本
投资运维成本	1	1	2	3
能源购买成本	1	1	2	4
单位公里净成本	1/2	1/2	1	2
污染物处理成本	1/3	1/4	1/2	1

表 6 可靠性指标判断矩阵

Tab. 6 Reliability index judgment matrix

评价指标	负荷缺电率	高速重要设施正常运作率	停电恢复时长
负荷缺电率	1	1/2	1
高速重要设施正常运作率	2	1	2
停电恢复时长	1	1/2	1

到标准矩阵,据所得到的标准矩阵分别计算各评价指标的变异系数、相关系数和独立性系数,然后通过计算得到各指标的综合系数,最后通过式(2)求得各评价指标的权重。

再计算 Spearman 相关系数、平均一致性、一致性系数以及各项指标的组合权重。4 种权重方法计算得出的权重如图 4 所示。由图 4 可以看出,组合权重有效地消除了单一赋权法的缺陷,如 CRITIC 法中负荷缺电率指标权重过高问题。熵权法中,其所确定的各项指标权重差距不明显,在后续的系统评价中差距也不明显。而层次分析法中,所确定的权重过于主观。

本文设计评价方法与其他几种方法差距的原因:

(1)本文方法与初步评价方法相差较大,初步评价方法各项指标所占比重相同,忽略了在整个评价过程中各项指标相对于最终评价结果重要性不同这一问题。本文方法评价结果中,投资运维成本、能源购买成本所占比重更高,而负荷缺电率、停电恢复时长、可再生能源利用率、污染物处理成本所占比重则较低,在评价中更加贴近实际工程,具有更高的适用性。

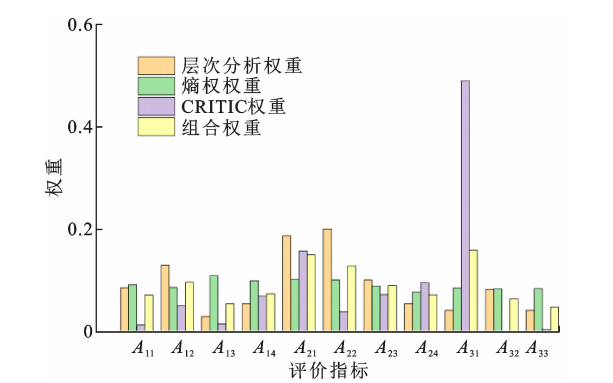


图 4 各评价指标权重

Fig. 4 Weight of each evaluation indicators

(2)层次分析法所得评价结果较依靠评价者的主观经验评估的客观性较弱,缺少对指标细化分析。与层次分析法这一主观赋权法相比,本文方法可以更加充分利用指标数据,弱化主观偏好因素,提高评估结果的客观性。

(3)与熵权法及改进 CRITIC 法这 2 个客观评价方法相比,本文方法增强了在评价过程中的主观能动性,缓解了评价中缺乏主观意愿的问题;熵权法计算所得各评价指标权重差别不大,难以体现各项指标在评价体系中的不同重要程度;改进 CRITIC 法所求得的负荷缺电率指标权重为 0.488 8,远高于其他各项指标权重的和,因此通过改进 CRITIC 法所求得的各系统最终评价分数及排名过分依赖负荷缺电率这一指标。

3.2.2 TOPSIS 评价

通过式(12)及式(13)计算各系统到正理想方案及负理想方案的欧氏距离,并通过式(14)计算各系统贴近度。计算结果如表 7 所示。

表 7 各系统欧式距离及贴近度

Tab. 7 Euclidean distances and fitting progress for each system				
系统	到正理想方案距离	到负理想方案距离	相对贴近度	排名
1	0.001 9	0.007 6	0.669 0	2
2	0.001 9	0.014 0	0.731 2	1
3	0.006 7	0.003 2	0.408 5	3
4	0.014 2	0.001 8	0.263 5	4

图 5 为各系统二级指标评分,由图 5 可以看出,4 个系统中的可靠性评价结果相差不大。4 个系统的能源性指标评分分别为 0.369 9、0.556 8、0.639 8、0.007 5;经济性评分分别为 0.556 9、0.787 4、0.331 8、0.106 5。系统 2 的经济性在 4 个系统中排在第一;其能源性虽然排在第二,但是与第一的差距不大,所以综合考虑,系统 2 最优;系统 1 的能源性评价结果在 4 个系统中排第三,经济性评价结果排

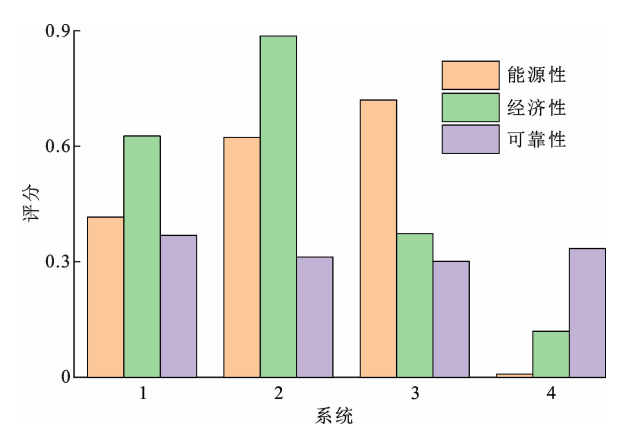


图 5 各系统二级指标评分

Fig. 5 Scores of secondary indicators for each system

第二,但其经济性评价结果与系统 2 差距较大,因此最终排在第二位;系统 3 的三方面评分都较为均衡,但经济性相较系统 1 略低,因此最终排名第 3;系统 4 则排第四位。

本文评价方法综合了主观性及客观性,最终求得各项指标权重既避免了单一权重过高问题,也避免了各项指标权重差别过小的问题,具有更高的科学性及实用性。

4 结 语

(1)本文结合了主观赋权法以及客观赋权法的优缺点,构建了层次分析-熵权-CRITIC 组合赋权方法。先计算出了层析分析法、熵权法、改进 CRITIC 法各个指标的权重,再计算出本文方法的权重。通过计算权重对比,组合权重有效地消除了单一赋权法的缺陷。

(2)本文选用 TOPSIS 法对系统进行评价。选取了 4 个不同系统,通过所设计评价方法对层次分析法、熵权法、改进 CRITIC 法以及本文设计的综合权重法分别进行评价。组合权重法与其他 3 个方法比较得出:组合权重法比层次分析法更加客观,弱化了主观因素;与熵权法比较,可以更好地体现各指标在系统中的重要程度;与改进 CRITIC 法相比,避免了单一指标权重过高的问题。

(3)本文在高速公路自洽能源系统综合评价指标选取时,对高速公路特有指标的选取更偏向于高速公路固定负荷,后续可以继续对高速公路上的随机负荷相关指标进行研究。

参考文献:  
References:

[1] 彭余华,唐 娜,朱鑫维.高速公路风光能源自洽照明

- 的功能配置方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(1): 120-128.
- PENG Yu-hua, TANG Na, ZHU Xin-wei. Functional configuration method of expressway wind-solar energy self-consistent lighting[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(1): 120-128.
- [2] 黎 博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
- LI Bo, CHEN Min-you, ZHONG Hai-wang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [3] 翁剑成, 孙宇星, 孔 宁, 等. 基于多源数据的公交专用道效能评价方法与影响模型[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 267-276.
- WENG Jian-cheng, SUN Yu-xing, KONG Ning, et al. Evaluation method and influence model of bus lane performance based on multi-source data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 267-276.
- [4] CUI J, LIANG Q Q, YIN X N, et al. The policy efficiency evaluation of the Beijing-Tianjin-Hebei regional government guidance fund based on the entropy method[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2022, 7(2): 433-446.
- [5] TOPCU E. Drought analysis using the entropy weight-based TOPSIS method: A case study of Kars, Turkey[J]. Russian Meteorology and Hydrology, 2022, 47(3): 224-231.
- [6] 叶 飞, 李文辉, 韩 鑫, 等. 基于动静结合的公路隧道洞口设计综合评价体系研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 125-135.
- YE Fei, LI Wen-hui, HAN Xin, et al. Comprehensive evaluation system for a highway tunnel portal design based on the combination of dynamics and statics[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 125-135.
- [7] GHOLAMI J, RAZAVI A, GHAFFARPOUR R. Decision-making regarding the best maintenance strategy for electrical equipment of buildings based on fuzzy analytic hierarchy process, case study: Elevator[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2022, 28(3): 653-668.
- [8] LIU J, XIE M Y, CHEN S Y, et al. TS-REPLICA: A novel replica placement algorithm based on the entropy weight TOPSIS method in spark for multimedia data analysis[J]. Information Sciences, 2023, 626: 133-148.
- [9] SHI D C, GUO Y J, GU X X, et al. Evaluation of the ventilation system in an LNG cargo tank construction platform (CTCP) by the AHP-entropy weight method[J]. Building Simulation, 2022, 15(7): 1277-1294.
- [10] YUAN X D, SONG W L. Evaluating technology innovation capabilities of companies based on entropy-TOPSIS: The case of solar cell companies[J]. Information Technology and Management, 2022, 23(2): 65-76.
- [11] FAHMI A. Particle swarm optimization selection based on the TOPSIS technique[J]. Soft Computing, 2023, 27(14): 9225-9245.
- [12] 许增光, 王亚萍, 肖 瑜, 等. 长深隧洞突涌水危险性等级指标及评价方法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 91-100.
- XU Zeng-guang, WANG Ya-ping, XIAO Yu, et al. Risk rating index and evaluation method for water inrush in long-deep tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 91-100.
- [13] ZHOU M, HAN J Q, LU J F. Actor-critic method for high dimensional static Hamilton-Jacobi-Bellman partial differential equations based on neural networks[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2021, 43(6): 4043-4066.
- [14] SAXENA P, KUMAR V, RAM M. A novel CRITIC-TOPSIS approach for optimal selection of software reliability growth model (SRGM)[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2022, 38(5): 2501-2520.
- [15] DHARA A, KAUR G, KISHAN P M, et al. An efficient decision support system for selecting very light business jet using CRITIC-TOPSIS method[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2022, 94(3): 458-472.
- [16] 贾利民, 程 鹏, 张 蜚, 等. “双碳”目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 173-183.
- JIA Li-min, CHENG Peng, ZHANG Zhe, et al. Integrated development of rail transit and energies in China: Development paths and strategies[J]. Strategic Study



of CAE,2022,24(3):173-183.

[17] ZHU W P,WU J J,YANG L L,et al. Construction of nursing care quality evaluation indicators for post-anaesthesia care unit in China[J]. Journal of Clinical Nursing,2023,32(1/2):137-146.

[18] SUN F,LI C J. A comprehensive evaluation method and application of shield tunnel structure health based on variable weight theory[J]. International Journal of Structural Integrity,2022,13(3):394-410.

[19] 王志丰,陈龙龙,王亚琼,等. 基于三角模糊理论的沉管隧道结构服役状态评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2023,43(1):82-91.

WANG Zhi-feng, CHEN Long-long, WANG Ya-qiong, et al. Evaluation method for health state of immersed tunnel structure in operation[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2023,43(1):82-91.

[20] PANCHAL S,SHRIVASTAVA A K. Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP):A case study of National Highway 5 in India [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13 (3):101626.

[21] 贺德强,柳国强,陈彦君,等. 基于正态云模型和模糊层次分析法的列车通信网络性能评估方法[J]. 交通运输工程学报,2022,22(2):310-320.

HE De-qiang, LIU Guo-qiang, CHEN Yan-jun, et al. Evaluation method of train communication network performance based on normal cloud model and fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2022,22(2):310-320.

[22] 王 可,陆 键,蒋愚明. 基于车辆行驶轨迹的道路不良驾驶行为谱构建与特征值计算方法[J]. 交通运输工程学报,2020,20(6):236-249.

WANG Ke, LU Jian, JIANG Yu-ming. Abnormal road driving behavior spectrum establishment and characteristic value calculation method based on vehicle driving trajectory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2020,20(6):236-249.

[23] 陈道想,林 鹏,丁 鹏,等. 基于群层次分析法的振冲碎石桩填料方法比选[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(12):1915-1921.

CHEN Dao-xiang, LIN Peng, DING Peng, et al. Vibro-stone column filling schemes based on Group AHP[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2022,62(12):1915-1921.

[24] ZUO Q T,ZHANG Z Z,WU B B. Valuation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (2):1-7.

[25] WU X X,ZHU Z Y,CHEN C, et al. A monotonous intuitionistic fuzzy TOPSIS method under general linear orders via admissible distance measures[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2023, 31 ( 5 ): 1552-1565.