

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230758

基于 Apriori-ANP 的电动汽车充电站 并网性能综合评估方法

于浩¹, 张大海¹, 赵轩², 张元星², 和敬涵¹

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 中国电力科学研究院有限公司
北京市电动汽车充换电工程技术中心, 北京 100192)

摘要: 电动汽车充放电行为的随机性, 导致充电站运行数据波动性强、指标间权重差距大, 传统方法难以全面准确评估其充电站的并网性能。为此, 提出了一种电动汽车充电站并网性能的综合评估方法。首先, 提出了包含安全性、适应性、稳定性等 5 项准则的综合评估指标体系。其次, 采用 Apriori 算法处理指标间关联关系。同时引入博弈思想将网络分析 (Analytic network process, ANP) 法与基于指标相关性的指标权重确定法结合以确定指标的最优组合权重。基于最优组合权重和基于逼近理想解排序法建立评估模型, 对各充电站并网的综合性能进行量化分析。最后, 采用某市电动汽车充电站运行数据对所提方法进行验证, 并与已有评估方法进行对比。结果表明所提评估体系与评估方法的有效性和优越性。

关键词: 电动汽车充电站; 并网性能; 指标体系; 组合权重; 基于最优组合权重和基于逼近理想解排序评估

Comprehensive evaluation method of the grid-connected performance of an electric vehicle charge and discharge station based on an Apriori-ANP

YU Hao¹, ZHANG Dahai¹, ZHAO Xuan², ZHANG Yuanxing², HE Jinghan¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Electric Vehicle Charging/Battery Swap Engineering and Technology Research Center, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The randomness of EV charging and discharging behavior leads to strong fluctuation of running data and large difference of weights among indexes, thus it is difficult for traditional methods to evaluate the grid-connected performance of EV charge and discharge stations comprehensively and accurately. Therefore, a comprehensive evaluation method for grid-connected performance of EV charge and discharge stations is proposed. First, a comprehensive evaluation index system including 5 criteria such as safety, adaptability and stability is proposed. Second, the Apriori algorithm is used to process the correlation between indicators. At the same time, a game idea is introduced to combine the ANP and CRITIC methods to determine the optimal combination weight of indicators. Based on the optimal combination weight and the TOPSIS method, an evaluation model is established to quantitatively analyze the comprehensive performance of grid-connected charge and discharge stations. Finally, the proposed method is verified by using the operating data of an EV charge and discharge station in a city, and compared with the existing evaluation methods. The results show that the proposed evaluation system and evaluation method are effective and superior.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B20103).

Key words: electric vehicle charge and discharge station; grid-connected performance; index system; combined weights; TOPSIS evaluation

0 引言

随着全球范围内环境污染和能源短缺的问题日

益严重, 具有清洁性的电动汽车以及具有 V2G(vehicle to grid)功能的电动汽车充电站正迅猛发展, 引起了广泛的关注^[1-2]。电动汽车充电站因其具有“双向供能”的特性, 同时为电网和用户提供包括参与电网调频^[3]、电网调控^[4]、削峰填谷^[5]在内的多种服

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (U22B20103)

务,具有较高的研究价值。然而电动汽车充电站电能传输具有很强的随机性、间歇性,大规模的并网会引起系统运行电压和频率波动的问题^[6]。因此,全面、准确地评估电动汽车充电站的并网性能对于进一步指导其发展具有重要意义。

目前,国内外学者分别从电能质量、充电站选址规划、服务能力等角度,提出了一系列的电动汽车充电站评估方案。文献[7-8]均对电动汽车并网的电能质量进行评估,前者引入组合权重对不同接入情况的电能质量指标进行分析,后者主要考虑电动汽车 V2G 模式下对不同区域电能质量指标的影响。文献[9]针对面向社会服务类车辆的电动汽车充电站选址规划问题,以筛选的权重信息集为约束条件建立模型计算权重,引入前景理论对充电站选点进行评估。文献[10-12]以电动汽车充电站的服务能力作为重点研究对象,分别从服务可靠性、充电站利润、服务效率等方面进行动态评估。文献[13]通过真实电网数据衡量 V2G 的影响,将净现值和内部收益率作为电动汽车并网经济性的标准进行评估。以上文献多数针对电动汽车充电站某个方面的单一指标,对于拥有 V2G 功能的电动汽车充电站并网性能综合评估,已有的评估指标体系未能考虑电动汽车充电站向电网放电的情况,存在一定的局限性。

在电力系统及电动汽车充电站的评估分析研究中,权重及评估方法的选择是其研究重点。对于评估过程中指标数据带来的不确定性问题,多用熵权法^[7]、主成分分析法^[14]、基于指标相关性的指标权重确定(criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)方法等客观权重法处理。熵权法在指标数目偏多、数据波动大时,权重分配的合理性有待考究;主成分分析法在评估指标较多、评估区分度低的情况下,会出现信息损失,对评价结果会产生较大影响^[15]。CRITIC 法是一种多属性赋权方法,同时兼顾评估指标数据的对比强度和冲突性,在多属性评估中得到了广泛的应用^[16]。鉴于以上的客观权重法均无法体现决策者意愿,文献[17-18]提出利用层次分析(analytic hierarchy process, AHP)法生成专家评判矩阵对熵权法进行修正,利用组合法增加权重的合理性。网络分析(analytic network process, ANP)法则在 AHP 法的基础上用网络结构代替了层次结构,弥补了 AHP 法无法兼顾指标间关联关系的缺陷,在指标存在关联性的综合评估中有较多的应用^[19-21]。然而在多指标评估模型中,ANP 法的指标间关系过于复杂、计算量较大,简化指标间的关联关系具有较高的研究价值。

基于以上分析可知,目前对于拥有 V2G 功能的

电动汽车充电站并网性能评估方面的研究仍存在一定的不足。为此,本文提出了适用于具有双向充放电功能的电动汽车充电站并网性能综合评估方法。首先,提出了包括安全、适应、稳定、经济和环境友好性 5 项准则,若干指标构成的指标体系。然后,利用博弈思想结合 Apriori-ANP 法与 CRITIC 法得到最优组合权重,基于逼近理想解排序(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)法与组合权重构建电动汽车充电站并网性能评估模型。最后,根据北京市具有 V2G 功能的电动汽车充电站运行数据对评估模型进行验证,证明了本文评估模型的正确性和有效性,其评估结果可以为电网评判电动汽车充电站并网性能优劣提供参考。

1 综合评估体系指标构建

1.1 综合评估体系指标构建思路

电动汽车充电站作为用户与电网的“连接点”,因其“双向供能”特性,需要考虑可接纳用户数量、功率传输效率、可调度容量等因素,这将影响用户的充电体验。同时用户在空闲时段对电网调控需求的响应,也会使电动汽车充电站的并网性能产生波动。电动汽车充电站作为新型可调节负荷,充电状态下会影响配电网稳定性和负荷分配,放电的不确定性使配电网对其容量和电能质量等方面提出特定要求,以确保其运行和并网状态的稳定性。构建电动汽车充电站并网性能评估指标体系需要涵盖用户、电动汽车充电站、配电网 3 个维度,并充分挖掘三者之间的关联关系;根据关联关系构建安全、适应、稳定等不同角度的可量化指标;指标数据真实可测,保证评估的可操作性。

为此,本文建立电动汽车充电站并网性能评估体系如图 1 所示,包含目标层、准则层和指标层 3 个层次,分析可充电站接入电网前后相关指标的变化情况,实现对电动汽车充电站并网性能的全面、科学、合理评估。

1.2 安全性指标

电动汽车充电站并网安全性主要考虑其充、放电状态下配电网设备及电力系统的安全。V2G 形式下的双向能量传输的不确定性,导致区域内负荷变化难以预测。这种不确定性对区域内变压器的运行安全产生更大的挑战,同时也对整个配电网设备的安全性造成潜在影响。电动汽车充电站并网对电力系统安全的影响主要表现在:配电系统电压和保护。充电站响应电网调度时,可能引起馈线上的负荷节点电压变化。由于电动汽车用户充放电行为

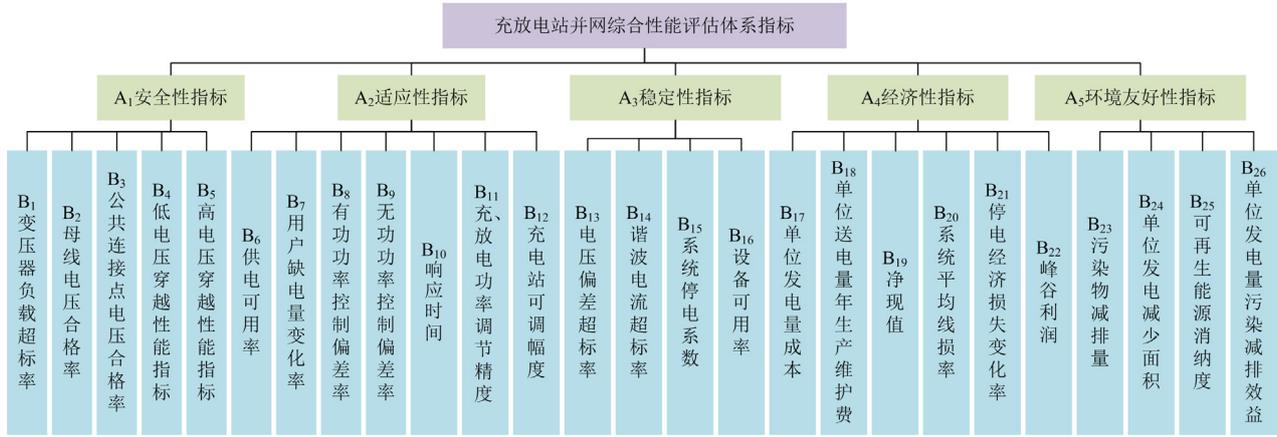


图 1 电动汽车充电站并网性能评估体系

Fig. 1 Grid-connected performance evaluation system of electric vehicle charge and discharge station

不确定性, 充电站的电能输出难以与配电系统负荷协调, 可能导致电压波动恶化。鉴于以上分析, 特选取变压器负载超标率 K_{OL} 、母线电压合格率 U_{HG} 、公共连接点电压合格率 L_{HG} 、低电压穿越性能指标 I_{LVRT} 、高电压穿越性能指标 I_{HVRT} , 对电动汽车充电站并网的安全性进行评估(部分公式见附录 A)。

电动汽车充电站的低电压穿越性能指标 I_{LVRT} 采用式(1)、式(2)进行计算。

$$I_{LVRT} = \sum_{i=1}^M (t_i - 0.15) / M + \sum_{j=1}^N (t_j - \Delta t_j) / N + \sum_{k=1}^S (t_k - 2) / S \quad (1)$$

$$\Delta t_j = \frac{U_B + 0.12U_N}{0.51U_N} \quad (2)$$

式中: M 、 N 、 S 为在电压跌落持续时间内平均跌落电压不满足低压穿越曲线的脱网次数; t_i 、 t_j 、 t_k 为充电站放电情况下发生脱网前的持续运行时间; Δt_j 为第 j 次电压跌落情况下允许脱网时间; U_B 为低电压穿越曲线电压; U_N 为标称电压。

电动汽车充电站的高电压穿越性能指标 I_{HVRT} 采用式(3)进行计算。

$$I_{HVRT} = \sum_{l=1}^{N_1} [\Delta t_{1l} / N_1] + \sum_{l=1}^{N_2} [(\Delta t_{2l} - 0.1) / N_2] + \sum_{l=1}^{N_3} [(\Delta t_{3l} - 10) / N_3] \quad (3)$$

式中: N_1 、 N_2 、 N_3 、 Δt_{1l} 、 Δt_{2l} 、 Δt_{3l} 分别为并网电压升高到 1.3、1.2~1.3、1.1~1.2 倍标称电压时充电站的脱网次数和发生脱网前持续运行的时间。

1.3 适应性指标

电动汽车充电站适应性分析考虑区域用户

供电、自身调节能力、配网调度 3 个方面, 分别考虑其不同状态下并网运行的性能变化。当电动汽车充电站以 V2G 功能参与电网调度放电时, 会对同一区域内的用户的用电产生影响。电动汽车充电站自身适应性主要表现在响应的速度以及自身的功率控制精度。其响应速度快、控制精度高, 其并网适应能力就强。电动汽车充电站参与辅助服务市场, 如调峰、调频等, 不同的服务种类对配网会产生不同的影响。故选用电动汽车充电站并网后供电可用率 K_{ASAI} 、用户缺供电量变化率 K_{xtdl} 、有功控制偏差率 K_p 、无功控制偏差率 K_Q 、响应时间 K_r 和充放电功率调节精度 K_C 和充电站可调幅度 α_g 作为适应性评估指标。

$$K_r = 2 - \frac{t_1}{t_N} \quad (4)$$

$$K_C = \frac{\int |P_C - P_{CN}(t)| dt}{\Delta t} \quad (5)$$

$$\alpha_g = P_{g,max} - P_{g,min} \quad (6)$$

式中: t_1 为实际响应时间; t_N 为辅助服务市场规定的标准响应时间; P_C 、 P_{CN} 分别为调节指令值和参与充电调节时的实际功率值; $P_{g,max}$ 、 $P_{g,min}$ 分别为充电站的最大、最小技术出力。

1.4 稳定性指标

电动汽车充电站稳定性主要考虑自身设备稳定和对配网电能质量影响两个方面。由于电动汽车充电站站内存在大量的交直流变换器, 与传统的供、用电设备不同, 交直流变换器运行会产生谐波、三相电流不平衡等电能质量问题。故选用电压偏差超标率 K_U 、谐波电流超标率 K_{th} 、系统停电系数 X_{td} 和设备可用率 B 作为稳定性评估指标。

$$K_U = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{NOD}}} n_{\text{Vdi}}}{n_{\text{NOD}}} \times 100\% \quad (7)$$

$$B = \frac{T_0}{T_0 + \sum_{i=1}^K T_{i,r}} \times 100\% \quad (8)$$

式中： n_{NOD} 为电动汽车充电站接入的电压等级下节点数； n_{Vdi} 为电动汽车充电站运行后第*i*个节点电压偏差超标变化情况； T_0 为采样期内充电设施累计正常运行时间； $T_{i,r}$ 为第*i*次故障的修复时间； K 为采样期内充电设施的故障次数。

1.5 经济性指标

电动汽车充电站的经济性是参与辅助服务市场推广和发展的重要依据。电动汽车充电站有计划的充、放电可以实现就地削峰填谷，从而最大化延缓发电装机与输配电升级改造。给电网以及用户带来效益的同时，通过电价差给自身带来经济收益。同时，电动汽车充电站响应电网调度，会降低电网线损和电网发电成本；在用电不变的情况下线损的减少也可以使增发电量降低，从而减少发电机组的排放，带来节能减排的效益。故采用单位发电量成本 C_{FD} 、单位发电量年生产维护费 C_{SC} 、净现值 N_{PV} 、系统平均线损率 L_{XS} 、停电经济损失变化率 C_{TD} 和峰谷利润 M_L 来评估电动汽车充电站的经济性。

$$C_{\text{FD}} = \frac{(C_{\text{YW}} + C_{\text{RL}} + C_{\text{AZ}} + C_{\text{YH}})}{E_{\text{FDL}}} \quad (9)$$

$$C_{\text{SC}} = \frac{(C_{\text{YW}} + C_{\text{RL}} + C_{\text{ZS}})}{E_{\text{FDL}}} \quad (10)$$

$$M_L = E_{\text{FDL}} \times (c_{\text{H}} - c_{\text{L}} - c_{\text{Y}}) \quad (11)$$

式中： C_{YW} 为年运行维护费用； C_{RL} 为员工费用； C_{AZ} 为建设安装费用等年值； C_{YH} 为电动汽车用户补贴成本； C_{ZS} 为充放电设备折损费用； E_{FDL} 为充电站年发电量； c_{H} 和 c_{L} 分别为负荷高峰和低谷电价； c_{Y} 为用户补贴价。

1.6 环境友好性指标

电动汽车充电站在节能、环保方面优势显著，对环保友好性的评估是其并网性能评估中不可缺少的环节。当前我国的电力生产仍以火电为主，新能源发电为辅，火力发电会向大气排放大量污染气体。在满足同样电力需求的情况下，电动汽车充电站并网可以对新能源进行消纳，在电网需要进行放电，从而降低火电投入，减少污染排放，达到节能减排的效果，也会带来一定的减排收益。同时，“双碳”目标下环保压力增大，电网建设用地

困难，电动汽车充电站作为交通、居民日常生活需要的基础设施建设，担任一定的调峰调频任务，可代替传统电站向电网提供能量，缓解用地焦虑。故选取污染物减排量 P_g 、单位发电减少面积 S_E 、可再生能源消纳度 e_r 和单位发电量污染物减排效益 C_{wr} 作为环境友好性指标。

$$P_g = \sum_{i=1}^T \left(\frac{G_c}{G_{\text{cn}}} \right) \quad (12)$$

$$S_E = \frac{S}{E} \times E_{\text{CN}} \quad (13)$$

式中： G_{cn} 和 G_c 分别为充电站并网放电前、后第*i*种污染气体(CO_2 、 SO_2 、 NO_x)的系统排放量； T 为总的污染气体类型数目； S 为传统电站占地面积； E 为传统电站额定能量； E_{CN} 为充电站放电能量。

2 基于 ANP-CRITIC 的最优组合权重

上述电动汽车充电站并网性能评估体系具有层次性，评估指标存在着相互关联与依赖的关系。故本文的指标权重确定方法中，首先，以关联分析算法^[22]发掘指标间关联规则，结合网络分析法^[23]确定主观权重；然后，利用 CRITIC 权重法确定客观权重；最后，以“偏差最小为目标”，对主、客权重进行融合，求取最优组合权重。最优组合权重计算步骤如图 2 所示。

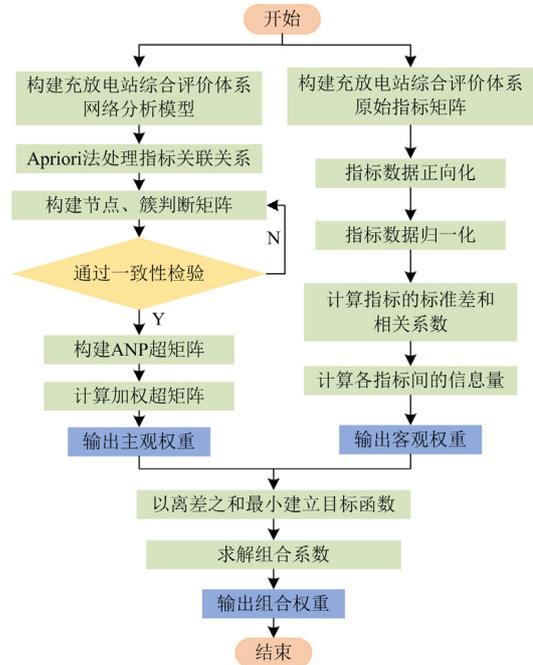


图 2 组合权重计算流程图

Fig. 2 Combined weight calculation flowchart

2.1 基于 Apriori-ANP 法确定主权重

ANP 法在 AHP 法的基础上加入了指标间相互影响关系,可以降低电动汽车随机性带来的评估指标间权重差距,使权重分配更加合理。但 ANP 法在各项指标关联规则中存在不确定性,会导致计算量过大。为解决此问题,本文引入 Apriori 法对指标间的关系进行预处理。通过对多位专家给出的指标关联方案进行分析,剔除不必要的关联因素,达到对 ANP 网络结构的简化。Apriori 法步骤如下所述。

把 n 名专家确定的指标关联关系定义为数据集 $\{S\}$, 每条连接关系数据组包含的指标 $B_j (j=1, 2, 3, \dots, m)$ 定义为项, B 为数据集 $\{S\}$ 中全部指标的集合作为项集, B 的任意子集中包含 k 个项称为 K 项集。设 B 的子集 $\{P\}$ 、 $\{Q\}$ 定义的支持度和置信度分别为

$$S_{\text{support}}(P) = \frac{\sigma(P)}{N} \quad (14)$$

$$C_{\text{confidence}}(P \Rightarrow Q) = \frac{S_{\text{support}}(P \cup Q)}{S_{\text{support}}(P)} \quad (15)$$

式中: $\sigma(P)$ 为数据集 $\{S\}$ 中包含数据组 L 的个数; N 为数据组个数; $S_{\text{support}}(P \cup Q)$ 为项集 $\{P\}$ 、 $\{Q\}$ 同时在关系数组中的概率。

定义 $MIN_{\text{Support}(P)}$ 和 $MIN_{\text{Confidence}(P \Rightarrow Q)}$, 满足以上两个条件则认为 $\{P\}$ 、 $\{Q\}$ 为强关联规则。对不满足强关联规则的关系进行剔除, 简化关联关系。

指标间关联关系简化之后, 利用 ANP 法计算主权重, ANP 法计算步骤如下所述。

1) 构造判断矩阵

在控制层准则下构造判断矩阵。经过一致性检验之后, 将其构造成局部权重向量矩阵 W_{ij} 。

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \dots & w_{i1}^{(jn_j)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \dots & w_{i2}^{(jn_j)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{in_j}^{(j1)} & w_{in_j}^{(j2)} & \dots & w_{in_j}^{(jn_j)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

2) 建立超矩阵

依次构造出全部元素集中的局部向量矩阵, 得到在控制准则下的特征向量构成的超矩阵 W_s 。

$$W_s = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & W_{NN} \end{bmatrix} \quad (17)$$

3) 建立加权超矩阵

在控制层准则下, 网络层每个元素对 $B_1, B_2, \dots,$

B_N 进行重要性比较, 得到归一化排序向量 $L_j =$

$$[l_{1j}, \dots, l_{Nj}]^T, \text{ 然后求出加权矩阵 } L = \begin{bmatrix} l_{11} & \dots & l_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ l_{N1} & \dots & l_{NN} \end{bmatrix},$$

对超矩阵进行加权处理得到加权超矩阵 $\bar{W}_s = LW_s$ 。

4) 得出主权重

求解每个加权超矩阵 \bar{W}_s 的极限, 通过式(18)即可得到网络层元素的权重, 即主权重。

$$W^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} (1/N) \sum_{s=1}^N \bar{W}_s^k \quad (18)$$

2.2 基于 CRITIC 的指标客观权重

CRITIC 法是基于数据波动性的客观赋权法^[24], 可以很好地解决数据的不确定性带来的指标数据波动过大导致评估不准确的问题。该方法同时考虑指标的变异性和相关性, 因为电动汽车充电站的评估指标之间通常存在关联, 所以 CRITIC 法可以更准确地计算各个指标的客观权重, 其计算客观权重计算步骤如下所述。

1) 无量纲化处理

为消除因量纲不同对评估结果的影响, 需要对各指标进行无量纲化处理, 对于越大越优、越小越优型指标分别使用式(19)和式(20)进行处理。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (19)$$

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (20)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个样本第 j 项评估指标的数值; $\max(x_{ij})$ 、 $\min(x_{ij})$ 分别为第 j 项评估指标的最大值和最小值。

2) 计算信息量

$$C_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m i=1 (x'_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m-1}} \times \sum_{i=1}^m (1-r_{ij}) \quad (21)$$

式中: C_j 为第 j 项指标信息量; \bar{x}_j 为评估指标均值; r_{ij} 为指标 i 与 j 之间的相关系数。

3) 计算权重

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (22)$$

式中, W_j 为第 j 项指标客观权重。

2.3 基于 ANP-CRITIC 的最优组合权重

在指标的权重计算过程中, 主观赋权法会导致

得到的权重主观性太强；客观赋权法可以充分挖掘数据，但不会体现决策者对各指标的重视程度。因此，本文将选取 ANP 法和 CRITIC 法两种赋权方法，以博弈论的思想协调两者之间的冲突并寻找两者之间的一致性，在一定程度上提高权重的科学性以及合理性^[25]。

设主观权重 W_1 和客观权重 W_2 的线性组合表达的指标组合权重向量 W 为

$$W = \begin{bmatrix} \lambda_1 w_{11} + \lambda_2 w_{21} \\ \lambda_1 w_{12} + \lambda_2 w_{22} \\ \vdots \\ \lambda_1 w_{1n} + \lambda_2 w_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{21} \\ w_{12} & w_{22} \\ \vdots & \vdots \\ w_{1n} & w_{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \lambda_1 W_1 + \lambda_2 W_2 \quad (23)$$

根据博弈论的思想建立目标函数，以指标组合权重 W 与 W_1 和 W_2 离差之和最小为目标，寻求最优的线性组合系数 λ_1 、 λ_2 ，此时的指标组合权重即最优组合权重 W^* 。目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min(\|\lambda_1 W_1 + \lambda_2 W_2 - W_1\|_2 + \|\lambda_1 W_1 + \lambda_2 W_2 - W_2\|_2) \\ \text{s.t. } \lambda_1 + \lambda_2 = 1, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$

根据微分原理，将式(24)取最小值的一阶导数条件为

$$\begin{cases} \lambda_1 W_1 W_1^T + \lambda_2 W_2 W_2^T = W_1 W_1^T \\ \lambda_1 W_2 W_1^T + \lambda_2 W_2 W_2^T = W_2 W_2^T \end{cases} \quad (25)$$

求出 λ_1 、 λ_2 ，进行归一化处理，得到权重系数 λ_1^* 、 λ_2^* ，进而得到的指标最优组合权重为

$$W^* = \lambda_1^* W_1 + \lambda_2^* W_2 \quad (26)$$

3 基于最优权重的充电站并网综合性能评估模型

为了对电动汽车充电站接入方案的并网性能给出优劣排序以及各特性评分对比，构造出一个基于最优权重与 TOPSIS 法相结合的电动汽车充电站并网性能评估模型。将通过电动汽车充电站运行数据得到的指标数据代入模型中，可得到电动汽车充电站接入方案的评分及排名。模型计算步骤如下所述。

1) 将原始数据处理得到指标数据矩阵，对矩阵进行正向化处理。将不同类型指标原始数据全部转化成极大型指标，此处将不赘述转化过程，详细公式可参照文献[24]。

2) 将正向化后的矩阵标准化，消除量纲影响。

3) 计算最优、最劣解。

将标准化后的矩阵作为评分矩阵，标准化之后矩阵中全部为极大型数据，即可从中挑选每个指标的最大值与最小值，构成最优解与最劣解向量。

$$\begin{cases} z^+ = [z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+] = \begin{bmatrix} \max\{z_{11}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{n1}\}, \dots \\ \max\{z_{1m}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{nm}\} \end{bmatrix} \\ z^- = [z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-] = \begin{bmatrix} \min\{z_{11}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{n1}\}, \dots \\ \min\{z_{1m}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{nm}\} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (27)$$

式中： z^+ 和 z^- 分别为各指标参数的最优和最劣解向量； z_{ij} 为指标数据矩阵标准化之后的指标对应值。

4) 计算每个方案各自与最优解和最劣解的距离，原始的 TOPSIS 模型中默认的各项指标不涉及其权重，未考虑各项指标的重要程度之间的区别，从而导致给充电站评分不准确。因此改进其计算最优解与最劣解的计算公式，加入 2.3 节得到的最优权重，改进后计算公式为

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j^* (z_j^+ - z_{ij})^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j^* (z_j^- - z_{ij})^2} \end{cases} \quad (28)$$

式中： d_i^+ 和 d_i^- 分别为各方案与最优最劣解的距离； W_j^* 为指标 j 对应的最优组合权重。

5) 根据最优解、最劣解计算得分并排序

$$S_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (29)$$

式中， S_i 为各方案最终评分。

4 算例分析

4.1 电动汽车充电站概况

基于北京市 3 个电动汽车充电站的实际运行数据(部分测试数据可见 <https://github.com/YU148210/01>)，经计算得到各评估指标数值，经过标准化处理得到表 1。本文依据所提的电动汽车充电站并网性能指标体系和评估模型，对上述电动汽车充电站的并网性能进行评估并得出评估结果。

4.2 Apriori 确定指标关联关系

首先，在确定主观权重之前使用 Apriori 法对指标间的连接关系进行简化，去除多余的连接关系。

以确定指标 B_{22} 与其他指标间关联关系为例，定义 $MIN_{\text{Support}(P)} = 40\%$ 和 $MIN_{\text{Confidence}(P \rightarrow Q)} = 75\%$ ，专家组给出的关联关系如表 2 所示，定义与 B_{22} 有相互关系的指标构成的数据集为 $\{S\}$ 。

表 1 标准化指标值矩阵
Table 1 Standardized matrix of metric values

充电站 1	充电站 2	充电站 3	指标标号
0.2425	0.9701	0	B ₁
0	0.9701	0.2425	B ₂
0	0.4175	0.9087	B ₃
0	0.9536	0.3011	B ₄
0.5927	0	0.8054	B ₅
0.4472	0	0.8944	B ₆
0	0.2223	0.9750	B ₇
0.4171	0.9089	0	B ₈
0.5093	0.8606	0	B ₉
0	0.8944	0.447 213 595	B ₁₀
0.8526	0.5226	0	B ₁₁
0.8575	0.5145	0	B ₁₂
0.3162	0.9487	0	B ₁₃
0	0.9487	0.3162	B ₁₄
0.8944	0.4472	0	B ₁₅
0	0.2900	0.9570	B ₁₆
0.3040	0.9527	0	B ₁₇
0	0.2425	0.9701	B ₁₈
0	0.9887	0.1498	B ₁₉
0.4763	0.8793	0	B ₂₀
0	0.9070	0.4211	B ₂₁
0	0.1376	0.9905	B ₂₂
0.9487	0.3162	0	B ₂₃
0.9762	0.2169	0	B ₂₄
0	0.9059	0.4236	B ₂₅
0.3624	0.9320	0	B ₂₆

表 2 与 B₂₂ 有相互关系的信息指标

Table 2 Information indicators that are interrelated with B₂₂

专家编号	B ₂₂ 关联指标
E ₁	B ₁₂ 、B ₁₈ 、B ₂₅ 、B ₂₆
E ₂	B ₁₂ 、B ₁₈ 、B ₂₄ 、B ₂₅
E ₃	B ₁₂ 、B ₁₈ 、B ₂₄ 、B ₂₅ 、B ₂₆
E ₄	B ₁₂ 、B ₁₈ 、B ₂₅ 、B ₂₆
E ₅	B ₁₃ 、B ₂₄ 、B ₂₅ 、B ₂₆

利用 Apriori 算法确定数据集 $\{S\}$ 中的频繁 k -项集, 1-项集如表 3 所示。

表 3 频繁 1-项集

Table 3 Frequent 1-item set

1-项集	专家标号	支持度/%	是否保留项集
B ₁₂	E ₁ 、E ₂ 、E ₃ 、E ₄	80	是
B ₁₃	E ₅	10	否
B ₁₈	E ₁ 、E ₂ 、E ₃ 、E ₄	80	是
B ₂₄	E ₂ 、E ₃ 、E ₅	60	是
B ₂₅	E ₁ 、E ₂ 、E ₃ 、E ₄ 、E ₅	100	是
B ₂₆	E ₁ 、E ₃ 、E ₄ 、E ₅	80	是

根据表 3 可以得到 B₁₃ 这项指标与 B₂₂ 之间的支持度, 支持度小于 40%, 则关联关系弱, 对此条连接关系进行剔除。根据 1-项集求满足 $MIN_{Confidence(P \Rightarrow Q)}$ 的频繁 k -项集 ($k=2,3,4$), 如表 4 所示。

表 4 频繁 2、3、4-项集

Table 4 Frequent 2, 3, 4-item set

频繁 k -项集	项	支持数	置信度/%
频繁 2-项集	B ₁₂ 、B ₁₈	4	100
	B ₁₂ 、B ₂₄	2	50(舍)
	B ₁₂ 、B ₂₅	4	100
	B ₁₂ 、B ₂₆	3	75
	B ₁₈ 、B ₂₄	2	50(舍)
	B ₁₈ 、B ₂₅	4	100
	B ₁₈ 、B ₂₆	3	75
	B ₂₄ 、B ₂₅	3	100
	B ₂₄ 、B ₂₆	2	66.6(舍)
	B ₂₅ 、B ₂₆	4	80
频繁 3-项集	B ₁₈ 、B ₂₅	4	100
	B ₁₂ 、B ₁₈ 、B ₂₅	4	100
	B ₁₂ 、B ₁₈ 、B ₂₆	3	75
	B ₁₂ 、B ₂₅ 、B ₂₆	3	75
频繁 4-项集	B ₁₈ 、B ₂₅ 、B ₂₆	3	75
	B ₁₂ 、B ₁₈ 、B ₂₅ 、B ₂₆	3	75

由表 4 可得, B₁₂、B₁₈、B₂₅、B₂₆ 同时满足 $MIN_{Support(P)} = 40\%$ 和 $MIN_{Confidence(P \Rightarrow Q)} = 75\%$, 可以证明此关联关系存在。剔除 B₁₃、B₂₄, 只保留 B₁₂、B₁₈、B₂₅、B₂₆ 与 B₂₂ 之间的相互影响关系。整体簇、指标间存在的相互影响关系如图 3 所示。

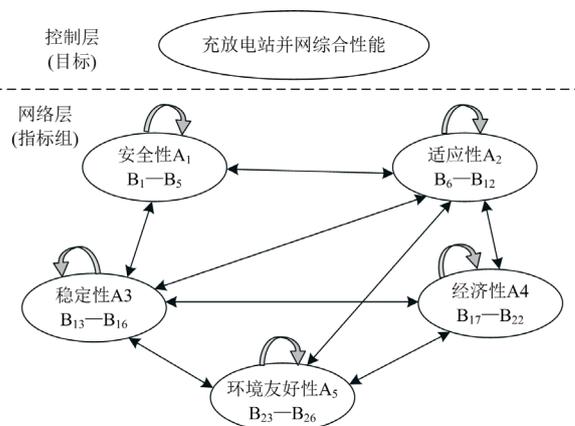


图 3 ANP 连接关系结构图

Fig. 3 ANP connection structure diagram

具体的各指标间的关联关系如表 5 所示。

表 5 指标间关联规则

Table 5 Rules for correlation between metrics

指标	关联关系指标
B ₃	B ₁ 、B ₂ 、B ₄ 、B ₅ 、B ₈ 、B ₉ 、B ₁₀ 、B ₁₃ 、B ₁₅ 、B ₁₆
B ₆	B ₁ 、B ₂ 、B ₇ 、B ₈ 、B ₉
B ₁₀	B ₈ 、B ₉ 、B ₁₁ 、B ₁₂
B ₁₂	B ₁₇ 、B ₂₅
B ₁₃	B ₁ 、B ₂ 、B ₄ 、B ₅ 、B ₈
B ₁₆	B ₁₇ 、B ₁₈ 、B ₁₉ 、B ₂₂
B ₁₈	B ₂₀
B ₁₉	B ₁₂ 、B ₁₇ 、B ₁₈ 、B ₂₀ 、B ₂₂ 、B ₂₃ 、B ₂₆
B ₂₂	B ₁₂ 、B ₁₇ 、B ₁₈ 、B ₂₅ 、B ₂₆
B ₂₃	B ₁₂ 、B ₁₈ 、B ₂₄ 、B ₂₆

4.3 ANP 主观权重计算

根据 4-2 指标间连接关系构建 ANP 单网络模型，设置总目标为充电站并网综合性能，网络层分为两级，一级指标 5 个，二级指标 26 个。根据 4.2 节的关系构成 16 个节点判断矩阵和 5 个簇判断矩阵。指标两两判断关系采用连续 1-9 标度法，通过问卷形式收集 5 位专家的指标间重要性比较数据。根据 2.1 节的计算公式，计算各指标的权重。由于矩阵阶数太大，本文借助专业软件 yaanp 求取主观权重计算结果。

图 4 对比了本文方法和 AHP 法得到的权重结果。ANP 法得到的主观权重相对于 AHP 法更加平缓，更适应随机性强、波动大的模型评估。这是因为 AHP 法只需要考虑单网络模型中下层指标对上层的重要性占比，但 ANP 法还需要考虑每层指标间的关联关系及其重要性。以指标 B₃ 的权重分析，ANP 法与 AHP 法得到权重分别为 0.0694 和 0.1131，ANP 法得到指标权重占比低。但由表 5 得知，指标 B₃ 与其他 10 个指标存在相关性，因此需要考虑这 10 项指标以及它们与上级指标间的重要性。经过对专家给出的数据进行分析计算，指标 B₃ 与相关的 10 项指标的权重按照重要性进行重新分配。

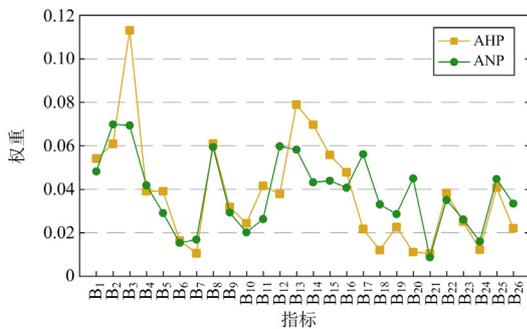


图 4 ANP-AHP 主观权重对比

Fig. 4 Subjective weight comparison of ANP-AHP

对本文方法与 AHP 法得到的指标主观权重进行灵敏度分析，重点在于研究指标间权重相互影响，以帮助决策者进行后续调整。图 5 展示了指标 B₁₇ 在两种方法中的横向灵敏度分析结果。AHP 法中的指标 B₁₇ 权重变化只会影响与其属于相同规则下的指标权重。然而，ANP 法由于网络层各指标的关联性，指标 B₁₇ 权重的变化会对与其存在关联性的其他指标权重产生影响。这表明了指标间连接关系对最终权重产生影响，并验证了 Apriori-ANP 法的有效性。

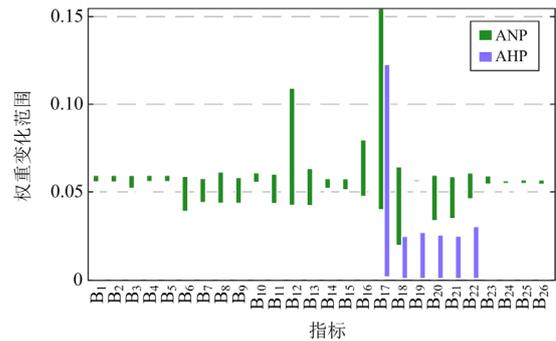


图 5 指标 B₁₇ 灵敏度分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of index B₁₇

4.4 最优组合权重确定

首先，计算出客观权重，再与主观权重结合计算最优组合权重。计算流程如图 2 所示。通过 2.2 节和 2.3 节计算得客观权重及最优组合权重。

图 6 为主、客观权重和最优组合权重的结果对比图，可以直观地看到主、客观、组合权重之间的联系与区别。例如：指标 B₂、B₈、B₁₃ 的主观权重指标远大于其客观指标权重值，指标 B₆、B₇、B₂₁、B₂₄ 的客观权重指标远大于其主观指标权重值，这样的权重值直接应用将会使得权重的合理性降低，最终会影响充电站并网的最终评估。通过博弈论思想求得最优组合权重处于两者之间，在一定程度上弱化了主观性或客观数据带来的权重偏差，将专家的主观意愿和实际客观数据的真实性充分结合，使得权重值更加合理。

4.5 评分排名与分值量化对比

在最优组合权重值以及指标原始矩阵都得到的基础上，按照电动汽车充电站并网性能评估模型计算步骤，利用第 3 节计算得到充电站各特性评分、不同充电站入网的评分值以及接入方案的排名。基于最优权重的充电站各特性评分结果如图 7 所示。由图 7 中结果可以看出每个充电站各特性的差异，也可以直观地看出充电站并网能力的优劣。在稳定性、适应性、安全性方面，充电站 2 的

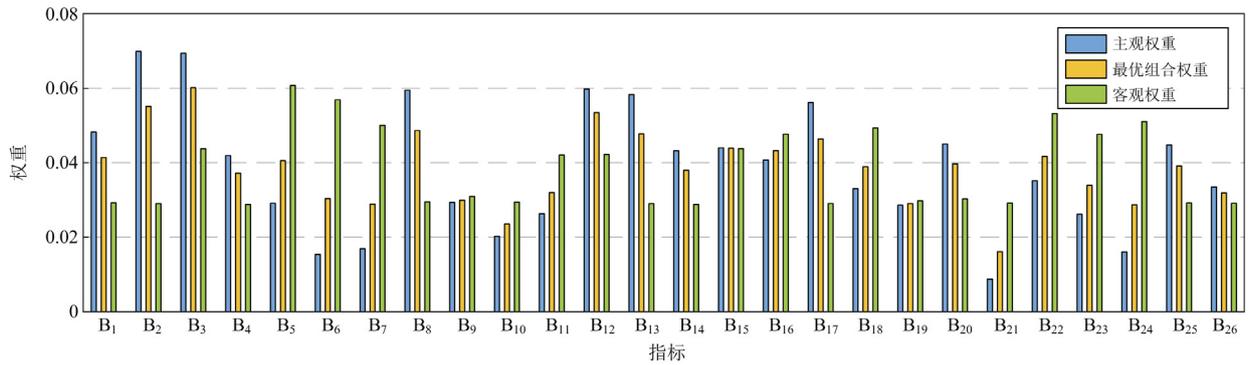


图6 充电站各指标权重占比

Fig. 6 Weight ratio of each indicator in charge and discharge station

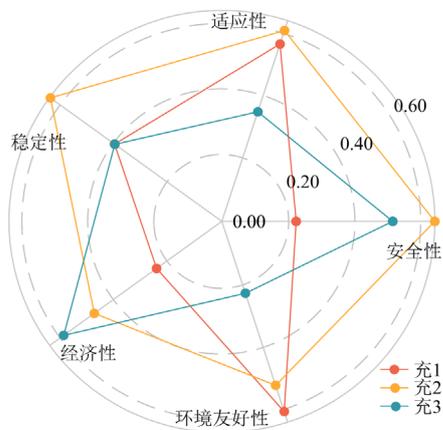


图7 充电站各特性评分

Fig. 7 Each characteristic score of charge and discharge station

得分明显高于其他两个充电站。在稳定性方面充电站 1、3 得分接近, 说明稳定性方面两站差别不大, 能力比较均衡。

在经济性和环境友好性方面, 充电站 2、3 评估得分更高, 但两站在经济性和环境友好性两个特性协调能力上相对较差; 经济性好的 3 号站, 环境友好性最差, 2 号站则恰恰相反, 因此可以根据得分情况对两站的特性对应的指标进行联合调整, 来达到并网能力提升的结果。

为验证本文所提最优组合赋权法的正确性, 采用常见的评估方法分别对 3 个电动汽车充电站并网性能进行评估, 与本文方法对比结果如图 8 所示。

由得分趋势可以看出, 2 号站并网能力最优, 1、3 站次之, 证明了本文评估方法及模型的有效性。前两种方法采用客观赋权法, 在综合评估中会过分依赖样本数据, 忽略主观想法。本文采用主客观相结合的最优组合权重法, 其得到的评估结果因为加入了评估方的主观意识, 且主观权重也考虑指标间

关联性, 相对于传统组合法采用的 AHP 法与熵权法结合得到的权重更加合理。

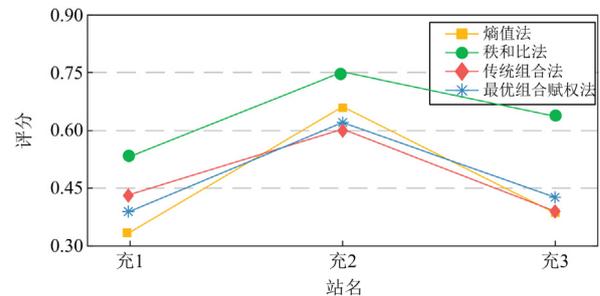


图8 不同方法下各充电站总评分

Fig. 8 Total score of each charge and discharge station under different methods

4.6 变指标值分析

上述电动汽车充电站并网性能使用的数据来源于某一时段的固定值, 而实际充电站运行数据则是不断变化的, 如: 充电站可调幅度会随着车主行为以及一些其他因素影响而不断变化, 同时由于指标间相互关联性, 也会影响其他指标值。因此, 考虑到实际充电站运行数据的不确定性, 将改进上述评估方法, 在保证评估正确性的情况下, 兼顾评估的适应性。为此, 本节引入云模型^[26]来检验本文评估方法的适应性, 同时与熵权法、AHP 与熵权法结合的传统组合法评估结果进行对比分析。

首先, 对表 1 中的矩阵进行处理, 设置充电站可调幅度指标的可能取值范围为 0.4~1, 其他所有指标的可能取值范围为 0.2~1。为直观比较各电动汽车充电站并网性能评估结果的鲁棒性, 分别采用上述 3 种综合评估法, 以考虑指标变动的方案综合评估值为样本数据, 通过逆向云发生器计算各方案的云模型 (E_x, E_n, H_e), 结果如表 6 所示。

从表 6 可以看出: 在考虑各指标变动情况下, 3 种方法进行综合评估时, 均为评分值越高越好, 充

充电站 2 的期望值最高, 充电站 3 次之, 充电站 1 最低; 对比 3 种方法各充电站的熵以及超熵, 本文提出的基于 Apriori-ANP-CRITIC 的最优组合赋权法均为最小。以上均证明本文提出的方法维持各自评分期望值的稳定性较好。为更加直观地对比 3 种方法的评估结果, 不同方法下各站评估结果的云模型分布如图 9 所示。

表 6 指标值变化下不同评估法的电动汽车充电站云模型
Table 6 Cloud model of electric vehicle charge and discharge station under different evaluation methods under index value change

综合评估法	充电站 1	充电站 2	充电站 3
最优组合赋权法	(0.3587, 0.0205, 0+0.0007 <i>i</i>)	(0.6074, 0.0135, 0.0011)	(0.4516, 0.0181, 0.0086)
熵权法	(0.2959, 0.0261, 0.0102)	(0.6077, 0.0194, 0.0084)	(0.3660, 0.0257, 0.0193)
AHP-熵权法	(0.2770, 0.0268, 0.0092)	(0.6107, 0.0195, 0.0115)	(0.3903, 0.0364, 0.0085)

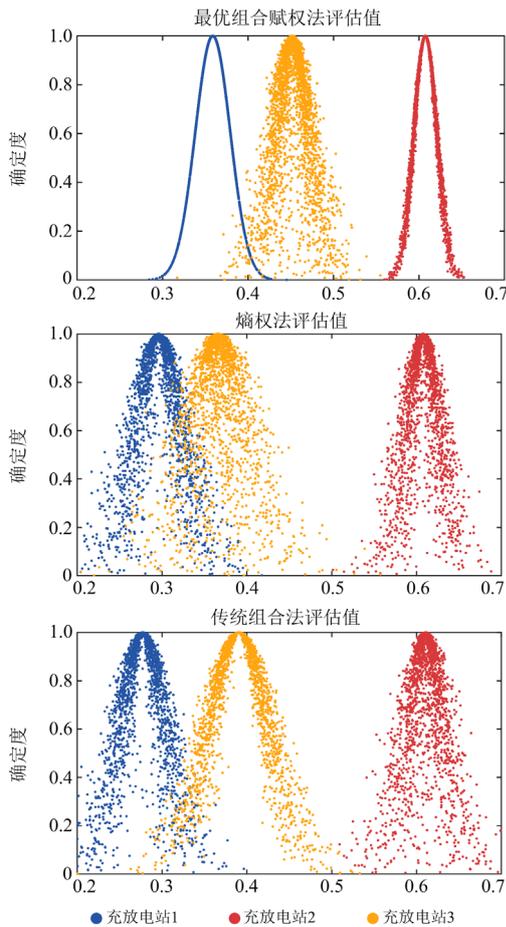


图 9 变指标下各电动汽车充电站正态云分布

Fig. 9 Normal cloud distribution of each electric vehicle charge and discharge station under variable index

从 3 种评估方法生成的评估结果的云图对比可看出: 本文提出的最优组合赋权法维持其评估方案期望值的稳定性比其他两种方法更好, 评估值交叉重叠最少, 即所有的电动汽车充电站排序稳定性高; 熵权法进行评估时, 充电站 1、3 评分重叠部分较多, 导致排序不稳定; 传统组合法充电站 1、3 重叠部分较少, 但各充电站评分随机性较大、评分不稳定、浮动较大。

综上所述, 在指标数据波动变化情况下, 本文提出的最优组合赋权法对电动汽车充电站并网性能进行评估的结果及各站排序鲁棒性最好, 其他两种方法得到的决策结果稳定性较差, 排序容易变化。

4.7 变权重灵敏度分析

采用客观权重的评估法进行电动汽车充电站并网性能评估时, 各指标权重均来源于指标值变化情况。在进行变权重灵敏度分析时, 要使指标值保持不变, 故不对采用客观权重的评估法进行分析。本节采用基于云模型变权重的灵敏度分析方法, 对比分析了本文提出的最优组合赋权法和传统组合法。以各指标权重变化下不同电动汽车充电站评分值为样本数据, 得到两种方法下的评估结果的云模型。参数如表 7 所示, 云模型分布如图 10 所示。

结合表 7 和图 10 可以看出: 本文提出的最优组合赋权法在 3 个电动汽车充电站并网性能评估结果中, 其超熵较小, 各个电动汽车充电站的评分值相对集中, 保持期望稳定性也较好。传统组合法保持评估期望值的稳定性较差, 且充电站 1、3 评估值超熵较大, 会导致评分过于分散、排序不稳定, 从而影响评估结果。鉴于充电站 1、3 本身的并网性能差距不大, 采用上述两种评估方法时, 充电站 1、3 的交叉重叠区域相差不大。但由于本文提出的最优组合赋权法在评估结果中的超熵更小, 得到的评估值稳定性更高, 因此在采用本文方法时, 3 个充电站排序发生的变化也比其他传统组合法更小。简单来说, 只要保证熵及超熵小, 即使评估的期望值彼此相差不大, 云模型重叠部分也会很小, 评估稳定性以及评估排序的准确性也会更高。

表 7 权重变化下不同评估法的各电动汽车充电站云模型

Table 7 Cloud models of charge and discharge stations of electric vehicles with different evaluation methods under weight change

综合评估法	充电站 1	充电站 2	充电站 3
最优组合赋权法	(0.3924, 0.2401, 0.0506)	(0.6361, 0.2573, 0+0.0293 <i>i</i>)	(0.4126, 0.2953, 0+0.0645 <i>i</i>)
AHP-熵权法	(0.3634, 0.1847, 0.0743)	(0.6793, 0.2050, 0.0745)	(0.3794, 0.2367, 0.0673)

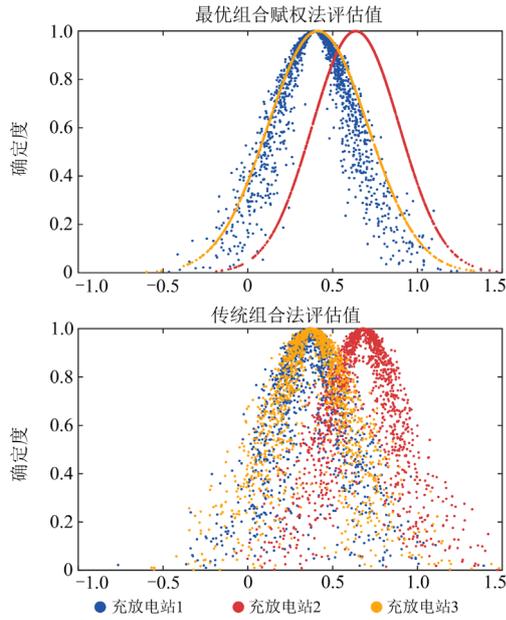


图 10 变权重下各电动汽车充电站正态云分布

Fig. 10 Normal cloud distribution of each electric vehicle charge and discharge station under variable weight

从整体上来看, 考虑变权重的情况, 本文提出的最优组合赋权法评估得到电动汽车充电站 2 的并网性能具有更优的鲁棒性。综上所述, 在对电动汽车充电站并网性能进行优选决策时, 本文提出的最优组合赋权法具有一定的优势, 既能保证评估结果的正确性, 又能维持评估的稳定性, 更能适应不确定性及模糊因素带来的影响。

5 结论

本文从安全性、适应性、稳定性、经济性及环境友好性 5 个方面构建了适用于电动汽车充电站的综合评估指标体系, 并采用最优组合赋权法与 TOPSIS 法结合的方法进行综合评分。最后通过某地区 3 个电动汽车充电站的实际运行数据, 验证了指标体系和评估方法的有效性和准确性, 得到以下结论。

1) 提出的并网性能综合评估体系从并网安全性、适应性、稳定性、经济性以及环境友好性 5 个方面对电动汽车充电站进行评估。引入博弈思想将 Apriori-ANP 法与 CRITIC 法相结合得到最优组合权重, 并与 TOPSIS 法构建评估模型。不仅使指标全面、可测, 而且可以有效地降低指标权重差, 使权重分配更加合理, 评估结果更加全面。

2) 基于云模型分析方法, 本文模拟了电动汽车行为的随机性导致的各指标及权重的不确定性和模

糊性。通过对比本文方法与其他综合评估法的评估结果的鲁棒性, 得到本文方法的评估结果在保证正确性的同时, 稳定性相对更强, 更能适应不确定性及模糊因素带来的影响。

综上所述, 本文提出的充电站并网综合性能评估体系与评估方法具有有效性和优越性, 在电动汽车充电站并网性能研究中有一定应用价值。

附录 A

充电站并网性能评估体系指标公式为

$$K_{OL} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{TS}} n_{TSi}}{n_{TS}} \quad (A1)$$

$$U_{HG} = (1 - \frac{T_{CX}}{T_{JC}}) \times 100\% \quad (A2)$$

$$L_{HG} = \frac{N_{FG} + N_{CG}}{N_{ZG}} \times 100\% \quad (A3)$$

式中: n_{TS} 为区域某一电压等级电网变压器台数; n_{TSi} 为 EV 充电站接入后变压器满载或过载的变化情况; T_{CX} 为电压越限时间; T_{JC} 为电压监测时间; N_{FG} 、 N_{CG} 分别为公共连接点在 EV 充电站充放电情况下的电压合格次数; N_{ZG} 测试时间内总测试次数。

$$K_{ASAI} = (1 - \frac{n_{tdsj}}{n_{ijsj}}) \times 100\% \quad (A4)$$

$$K_{xtdl} = (1 - \frac{n_{hqdl}}{n_{qqdl}}) \times 100\% \quad (A5)$$

$$K_p = (\frac{|P_m - P_s|}{P_s}) \times 100\% \quad (A6)$$

$$K_Q = (\frac{|Q_m - Q_s|}{Q_s}) \times 100\% \quad (A7)$$

式中: n_{tdsj} 为用户停电时间; n_{ijsj} 为统计时间; n_{hqdl} 为并网后用户缺电量; n_{qqdl} 为并网前用户缺电量; P_m 为实测有功功率值; P_s 为设定有功功率值; Q_m 为实测无功功率值; Q_s 为设定无功功率值。

$$K_{lh} = \frac{n_{DGlh} - n_{lh}}{n_{NOD}} \times 100\% \quad (A8)$$

$$X_{td} = \frac{\sum_{r=1}^N t_r \times n_r}{N} \quad (A9)$$

式中: n_{lh} 、 n_{DGlh} 分别为充电站运行前、后谐波电流超标节点数; n_{NOD} 为区域某一电压等级电网节点数; N 为设备数量; t_r 为设备停运时间; n_r 为该设备停用次数。

$$N_{PV} = \sum_{i=1}^n (C_i - C_o)_i (1 + i_c)^{-i} \quad (A10)$$

$$L_{XS} = \frac{(E_{FGD} + E_{FDL} - E_{SD})}{(E_{FGD} + E_{FDL})} \times 100\% \quad (A11)$$

$$C_{TD} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{FH} \times C_{TS}) - \sum_{i=1}^n (E_{HFH} \times C_{TS})}{\sum_{i=1}^n (E_{FH} \times C_{TS})} \times 100\% \quad (A12)$$

式中： C_i 为现金流入； C_o 为现金流出； i_c 为基准收益率； E_{FGD} 为非 EV 充电站年发电量； E_{SD} 为 EV 充电站年交易电量； E_{FH} 、 E_{HFH} 分别为安装充电站前、后第 i 种负荷停电量； C_{TS} 为第 i 种负荷停电损失。

$$e_r = \frac{E_r}{E} \times 100\% \quad (A13)$$

$$C_{wr} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{wr} \times C_{wfr}) - \sum_{i=1}^n (E_{hwr} \times C_{wfr})}{E_{FDL}} \quad (A14)$$

式中： E_r 、 E 分别为 EV 充电站参与辅助服务市场时可再生能源增发电量、充电站放电量； E_{wr} 、 E_{hwr} 分别为 EV 充电站投运前、后第 i 种污染物年排放量； C_{wfr} 为第 i 种污染物治污费用。

参考文献

- [1] 陈明强, 高健飞, 畅国刚, 等. V2G 模式下微网电动汽车有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 141-148.
CHEN Mingqiang, GAO Jianfei, CHANG Guogang, et al. Research on orderly charging strategy of micro-grid electric vehicles in V2G model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 141-148.
- [2] 肖丽, 谢尧平, 胡华锋, 等. 基于 V2G 的电动汽车充放电双层优化调度策略[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 164-171.
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for ev's charging and discharging based on V2G[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 164-171.
- [3] 米阳, 伦雪莹, 孟凡斌, 等. 基于无模型算法和电动汽车辅助调节的新能源电力系统频率协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 13-20.
MI Yang, LUN Xueming, MENG Fanbin, et al. Frequency coordinated control of a new energy power system based on a model-free algorithm and electric vehicle auxiliary regulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 13-20.
- [4] 程杉, 杨堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充放电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.
CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of an electric vehicle charging station considering price optimization and discharge behavior control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.
- [5] 蔡黎, 葛棚丹, 代妮娜, 等. 电动汽车入网负荷预测及其与电网互动研究进展综述[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 96-103.
CAI Li, GE Pengdan, DAI Nina, et al. Review of research progress on load prediction and grid interaction of electric vehicles[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 96-103.
- [6] LIU Xiaou. Dynamic response characteristics of fast charging station-EVs on interaction of multiple vehicles[J]. IEEE Access, 2020, 8: 42404-42421.
- [7] 查鹏程, 甘雅丽, 高海祐, 等. 电动汽车充电站接入配电网的电能质量评估[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 69-75.
ZHA Pengcheng, GAN Yali, GAO Haiyou, et al. Quality assessment of electric vehicle charging stations accessing distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 69-75.
- [8] CHEN Wei, ZHENG Lei, LI Hengjie, et al. An assessment method for the impact of electric vehicle participation in V2G on the voltage quality of the distribution network[J]. Energies, 2022, 15(11): 4170.
- [9] 李滨, 陈嘉程, 严康, 等. 社会服务类汽车充电站选点规划评价体系构建与应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7): 29-40.
LI Bin, CHEN Jiacheng, YAN Kang, et al. Construction and application of evaluation system for charging station site selection planning of social service electric vehicles[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2021, 33(7): 29-40.
- [10] 盛锐, 唐忠, 薛佳诚. 多指标下 electric vehicle 充电站服务能力动态评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4891-4904.
SHENG Rui, TANG Zhong, XUE Jiacheng. Dynamic evaluation method of electric vehicle charging station service capability under multi indicators[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4891-4904.
- [11] 王呈轩, 樊艳芳, 李弘昌, 等. 直流微网供电的电动汽车无线充电站控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 126-134.
WANG Chengxuan, FAN Yanfang, LI Hongchang, et al. Research on the control strategy of electric vehicle wireless charging station powered by DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 126-134.
- [12] ZENGINIS I, VARDAKAS J, ZORBA N, et al. Performance evaluation of a multi-standard fast charging station for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on

- Smart Grid, 2018, 9(5): 4480-4489.
- [13] GUEDES W, JOSE C F, BRUNO D, et al. Techno-economic assessment of electric vehicle charging infrastructure development in Brazilian universities[C] // 2019 IEEE Milan Power Tech, June 23-27, 2019, Milan, Italy: 1-6.
- [14] 肖白, 刘亚伟, 施永刚, 等. 基于主成分分析的中压配电网供电可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 7-12.
XIAO Bai, LIU Yawei, SHI Yonggang, et al. Power supply reliability assessment of mid-voltage distribution network based on principal component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 7-12.
- [15] 俞立平. 客观赋权法本质及在科技评价中的应用研究——以学术期刊为例[J]. 情报理论与实践, 2021, 44(2): 50-56.
YU Liping. Study on the essence of objective weighting method and its application in scientific and technological evaluation[J]. Information Studies: Theory & Application, 2021, 44(2): 50-56.
- [16] 罗宁, 贺墨琳, 高华, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC 组合赋权与可拓评估模型的配电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 86-96.
LUO Ning, HE Molin, GAO Hua, et al. Comprehensive evaluation method for a distribution network based on improved AHP-CRITIC combination weighting and an extension evaluation model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 86-96.
- [17] 李响, 牛赛. 双碳目标下源-网-荷多层评价体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 178-184.
LI Xiang, NIU Sai. Study on multi-layer evaluation system of source-grid-load under carbon-neutral goal[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 178-184.
- [18] 邱威, 贺静波, 谭真, 等. 一种用于含直流馈入的受端电网故障筛选与排序方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3516-3524.
QIU Wei, HE Jingbo, TAN Zhen, et al. Contingency screening and ranking for receiving-end power grid with infeed HVDC[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3516-3524.
- [19] ZHOU Jie, SU Xiaoyan, HONG Qian. Risk assessment on offshore photovoltaic power generation projects in china using D numbers and ANP[J]. IEEE Access, 2020, 8: 144704-144717.
- [20] ZHANG Wenjun, LAI Taotao, YAO Li. Risk assessment of water supply network operation based on ANP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13(1): 04021068.
- [21] MARZIEH M, POURGHASEMI H R, MOKARRAM M J. A multi-criteria GIS-based model for wind farm site selection with the least impact on environmental pollution using the OWA-ANP method[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29: 43891-43912.
- [22] 王凌云, 林跃涵, 童华敏, 等. 基于改进 Apriori 关联分析及 MFOLSTM 算法的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 74-81.
WANG Lingyun, LIN Yuehan, TONG Huamin, et al. Short-term load forecasting based on improved Apriori correlation analysis and an MFOLSTM algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 74-81.
- [23] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 174-182.
CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 174-182.
- [24] 赵洪山, 李静璇, 米增强, 等. 基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 1-8.
ZHAO Hongshan, LI Jingxuan, MI Zengqiang, et al. Grading evaluation of power quality based on CRITIC and improved Grey-TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 1-8.
- [25] 南东亮, 王维庆, 张陵, 等. 基于关联规则挖掘与组合赋权-云模型的电网二次设备运行状态风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 67-76.
NAN Dongliang, WANG Weiqing, ZHANG Ling, et al. Risk assessment of the operation state of power grid secondary equipment based on association rule mining and combination weighting-cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 67-76.
- [26] 何永贵, 刘江. 基于组合赋权-云模型的电力物联网安全风险评估[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4302-4309.
HE Yonggui, LIU Jiang. Electric Internet of things security risk assessment based on combined weighting-cloud model[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4302-4309.

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-09-24

作者简介:

于浩(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车充电站并网技术; E-mail: 21121527@bjtu.edu.cn

张大海(1973—), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为电力系统监控、继电保护与电能质量; E-mail: dhzhang1@bjtu.edu.cn

赵轩(1997—), 女, 工程师, 研究方向为电动汽车充换电技术。E-mail: xuan32016@163.com

(编辑 姜新丽)