

城市充电服务网多维评估指标体系与方法

王敏, 向月*, 周椿奇, 赵黄江, 刘俊勇

(四川大学电气工程学院, 四川省 成都市 610065)

Multi-dimension Evaluation Index System and Method of Urban Charging Service Network

WANG Min, XIANG Yue*, ZHOU Chunqi, ZHAO Huangjiang, LIU Junyong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

Abstract: The layout planning and operation mode of charging service network determine the development prospect of electric vehicles. In the future, with the rapid increase of penetration rate of electric vehicles, it is necessary to ensure the sustainable development margin of charging service network, reasonably evaluate the charging service network in order to find out poorly operation areas and weak links, and provide improvement basis for the continuous high-quality operation of the subsequent charging service network. Therefore, the dynamic comprehensive evaluation index system and evaluation method of charging service network are proposed considering the users, transportation network and distribution network. First, the multiple attributes of urban charging service network are analyzed, and a multi-dimensional evaluation index system is established based on users, transportation network and distribution network. Then, the grey correlation analysis method based on combination weighting method is used to quantitatively analyze the influence of charging service network on each subject index. Finally, the feasibility of the proposed evaluation model and method is verified through simulation, and the existing charging service network in a southwest region is comprehensively evaluated, which provides a reference for charging station location.

Keywords: charging service network; electric vehicle; multi-dimensional dynamic assessment; combination weighting; grey correlation method

摘要: 城市充电服务网的规划布局与运营模式决定了电动汽车的发展前景, 在未来电动汽车渗透率急剧上升的情况下保证充电服务网可持续发展裕度, 合理评估充电服务网以挖掘其运行不良区域与薄弱环节, 可为后续充电服务网的持续优质运行提供改进依据。为此, 提出考虑电动汽车用户、交通网、配电网等多方主体的充电服务网动态综合评价指标体

系与评估方法。首先, 分析城市充电服务网的多重属性, 结合用户、交通网、配电网建立多维评价指标体系; 接下来, 采用基于组合赋权的灰色关联度分析法量化分析充电服务网对各主体指标的影响; 最后, 通过仿真验证所提评估模型和方法的可行性, 对西南地区某现有充电服务网络进行综合评价, 为充电站后续的建站选址提供参考依据。

关键词: 充电服务网; 电动汽车; 多维动态评估; 组合赋权; 灰色关联度法

0 引言

发展电动汽车是应对全球气候变化、推动绿色发展的战略举措^[1-3]。中国坚持纯电驱动取向, 以有效促进节能减排水平的提升。2020年发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》^[4]部署加快推动充换电基础设施建设, 提升与能源、交通、信息通信互联互通水平的战略任务。如今, 电动汽车产业发展态势持续高走, 对充电基础设施数量、布局、服务效率等方面提出高需求和要求。然而, 现今的电动汽车充电桩仍存在布局不合理、利用率低、服务效率低等问题^[5-9], 限制了电动汽车产业的发展, 因此, 合理评估充电设施建成后形成的充电服务网, 提出考虑用户、交通网和配电网多方主体的充电服务网综合评价指标体系能够对解决上述问题提供保障。

当前文献结合电动汽车充电服务网的多重属性, 对电动汽车充电服务网络进行评估。文献[10]着眼于电动汽车充换电服务网络的服务特性, 考虑服务网和配电网的交互关系, 建立配电网接纳能力模型, 对充电基础设施配置进行评估; 文献[11]建模分析充电站的服务质量, 考虑了城市、郊区和农村的差异; 文献[12]从快充站(fast charging stations, FCSs)运营商机

基金项目: 国家自然科学基金(52111530067)。

National Natural Science Foundation of China (52111530067).

润和顾客排队时间两个方面对FCS的运营效果进行评价。上述文献仅考虑充电站对配电网、用户的影响。在此基础上,文献[13]进一步分析充电服务网与配电网、交通网建立的耦合关系,提出三网融合下的充电服务网综合评估指标体系;文献[14]在考虑三网融合情况下,计及电动汽车用户的充电体验,分析用户-快充网-交通网-配电网四者的耦合交互关系,构建电动汽车快充网综合评估指标体系。目前,电动汽车充电站的评估方法主要有层次分析法、熵值法等^[11-12, 15]。其中层次分析法主要为主观赋权,存在一定的局限性。因此,电动汽车充电服务网的评估应同时考虑主观和客观角度评估分析。

鉴于以上分析,为弥补充电服务网络评估的不精准性和不全面性,本文基于组合赋权的灰色关联度分析法对电动汽车充电站进行动态评估,考虑对配电网、交通网、用户的影响,分析多网络耦合交互关系,量化评估电动汽车充电站的发展潜力空间。通过挖掘不同区域的电动汽车充电站薄弱环节,为后续充电站持续优质运行提供有力保证。

1 城市充电服务网综合评估指标体系及计算模型

充电服务网与交通网、配电网关联紧密,协同发展,综合考虑城市充电服务网的宏观布局和微观运行特性,耦合分析充电服务网-交通网-配电网,寻求充电服务网与交通网、配电网内部关联关系。在此基础上从充电服务网层、电动汽车用户体验层、道路交通网层和城市配电网层四个维度建立多维度评价指标体系,针对每个维度提出多个下属指标,全面、科学、合理评价现有网络的运行效果,为充电服务网的规划提供科学参考。图1为城市充电服务网综合评估指标体系。

1.1 充电服务网层

从便利性、安全性、互动性、节能性、经济性和合理性六个维度建立充电服务网层综合评估指标体系。

1) 平均利用率。

平均利用率 A_U 表示充电站内设备的平均利用率,真实反映充电站内桩的利用情况。具体计算方法如式(1)所示。

$$A_U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T_{u,i}}{T_0} \quad (1)$$

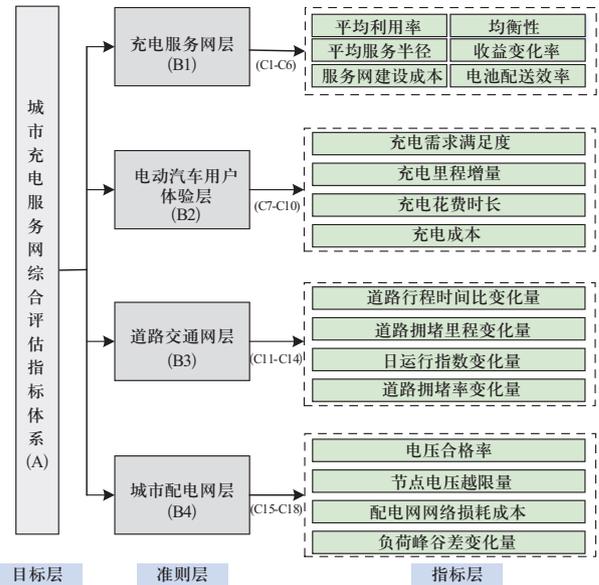


图1 城市充电服务网综合评估指标体系

Fig. 1 Comprehensive evaluation index system of electric vehicle charging network

式中: N 为充电站的总数量; $T_{u,i}$ 为第 i 个充电站的实际正常工作的时间; T_0 为总的检测时间。

2) 均衡性。

均衡性 σ 反映不同充电站运行水平的差异,指不同充电站利用率的离散程度。计算方法如式(2)所示。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_{u,i}}{T_0} - A_U \right)^2} \quad (2)$$

3) 平均服务半径。

平均服务半径 R 与充电站容量有关,一定程度反映充电站能覆盖的服务面积,具体计算方法如式(3)~(4)所示。

$$\gamma = \left\lfloor \frac{Q}{(L/B)q} \right\rfloor \quad (3)$$

$$R = \gamma / \rho \quad (4)$$

式中: Q 为充电站容量; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整; L 为电动汽车充满到现在行驶的距离; B 为能行驶的最大距离; q 为电动汽车电池容量; ρ 为区域内电动汽车的密度。将电动汽车分为电动私家车、电动出租车和电动公交车三类。

4) 收益变化率。

收益变化率 $\Delta B_{t,t-1}$ 反映充电站的运行经济性,从时间尺度上评估电动汽车充电站的收益变化。计算方法如式(5)所示。

$$\Delta B_{t,t-1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{M_{t,i} - M_{av,i}}{M_{av,i}} \quad (5)$$

式中: $M_{t,i}$ 为当前时段充电站 i 的收益; $M_{av,i}$ 为充电站 i

收益的平均值。

5) 充电服务网建设成本。

充电服务网建设成本 M_{cs} 是充电站建设经济性的直接体现, 计算方法如式(6)–(8)所示。

$$M_{cs} = \sum_{i=1}^N (M_C N_i + M_L S N_i + M_D P N_i + M_E P_{E,i} \xi_i) \quad (6)$$

$$P_{E,i} = P_D - P N_i \quad (7)$$

$$\xi_i = \begin{cases} 0, & P_{E,i} \geq 0 \\ 1, & P_{E,i} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: M_C 为充电机单价; N_i 为充电机数量; M_L 为土地单价; S 为单个充电机所占土地面积; M_D 为单位容量投资成本; P 为充电机功率; M_E 为配电网扩容投资单位成本; $P_{E,i}$ 为扩建容量; P_D 为充电站接入配电网的变压器容量; 当 $P_{E,i} \geq 0$ 时, 即不需扩容, ξ_i 取值为0, 反之为1。

6) 电池配送效率。

集中式充电站提供换电服务时重点考虑电池配送车辆往返充电站与换电站的行驶路径和电池配送效率。电池配送效率 f 的计算方法如式(9)所示。

$$f = \frac{V_c}{D_{ij}} \quad (9)$$

式中: D_{ij} 是采用Dijkstra算法^[10]求取的充电站 i 到换电站 j 之间最短路径; V_c 是电池配送车辆的平均速度。

1.2 电动汽车用户体验层

7) 充电需求满足度。

充电需求满足度 X_D 代表用户的充电需求能被满足的比例, 反映充电站服务的可靠程度^[14], 计算方法如式(10)–(11)所示。

$$X_D = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \theta_k \quad (10)$$

$$\theta_i = \begin{cases} 1, & k \text{ 为完成充电的用户} \\ 0, & k \text{ 为未完成充电的用户} \end{cases} \quad (11)$$

式中: K 为有充电需求的电动汽车用户总量; θ_k 为用户 k 的充电服务系数。

8) 充电里程增量。

充电里程增量 ΔL_D 指用户完成充电使行驶里程增加的量, 反映了城市充电服务网络为电动汽车用户提供的服务在空间上的便利程度。

$$\Delta L_D = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (L_{D,k} - L_{D,k,0}) \quad (12)$$

式中: $L_{D,k}$ 为第 k 辆电动汽车从起点经充电站最终到达

目的地的总最短里程; $L_{D,k,0}$ 为电动汽车从起点到达终点的最短里程。

9) 充电花费时长。

用户充电花费时长 T_C 是指用户完成充电的总时间, 包含用户 k 在站内的排队等待时间 $T_{w,k}$ 和充电时间 $T_{c,k}$, 反映服务网提供充电服务的高效性, 具体计算方法如式(13)所示。

$$T_C = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (T_{w,k} + T_{c,k}) \quad (13)$$

10) 充电成本。

电动汽车用户的充电成本 M_{EV} 反映用户充电的花费。

$$M_{EV} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (M_{c,k} + M_{s,k}) \quad (14)$$

式中: $M_{c,k}$ 和 $M_{s,k}$ 分别为电动汽车用户 k 的充电费用和服务费用。

1.3 道路交通网层

11) 道路行程时间比变化量。

道路行程时间比(travel time index, TTI)^[16]变化量可反映充电网对道路产生的影响, 根据简化的速度-流量模型^[17], 获取道路间车辆的行驶速度, TTI越大, 说明道路状况越差, 即越拥堵, 具体计算方式如式(15)–(17)所示。

$$\Delta I_{TTI} = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \left(\frac{\bar{T}_{ij}}{T_{j0}} - \frac{\bar{T}_{ij0}}{T_{j0}} \right) \quad (15)$$

$$\bar{T}_{ij} = \frac{L_j}{V_{ij}} \quad (16)$$

$$\bar{T}_{ij0} = \frac{L_j}{V_{ij0}} \quad (17)$$

式中: $I_{TTI,j}$ 为路段 j 在某一时间间隔 t 内的行程时间比; \bar{T}_{ij} 为路段 j 在某一时间间隔 t 内车辆行驶的平均时间; T_{j0} 为在自由流状态下的行程时间; L_j 为路段 j 的距离; V_{ij} 为路段 j 在某一时间间隔 t 内车辆行驶平均速度; \bar{T}_{ij0} 为建站前的平均行程时间; V_{ij0} 为建站前的自由流速度。

12) 道路拥堵里程变化量。

道路拥堵里程变化量 ΔL 从空间上反映充电网对交通网运行的影响。引入道路等级 G 和道路拥堵系数 α , G 的值越大, 表明该路段拥堵程度越大, ΔL 的具体计算方法如式(18)所示。

$$\Delta L = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (\alpha_{tj} G_j - \alpha_{tj0} G_j) \quad (18)$$

式中: α_{tj} 为时段 t 道路 j 的拥堵系数; α_{tj0} 为建站前时段 t

道路*j*的拥堵系数。

13) 日运行指数变化量。

道路交通运行指数 (traffic performance index, TPI) 综合反映道路交通的运行状况。TPI变化量 ΔI_{TPI} 可反映充电网络对交通网的综合水平影响, ΔI_{TPI} 具体计算方法如式(19)所示。

$$\Delta I_{TPI} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (I_{TPI,tj} - I_{TPI,tj0}) \quad (19)$$

式中: $I_{TPI,tj0}$ 和 $I_{TPI,tj}$ 分别为充电站运行前后的TPI值。

14) 道路交通拥堵率变化量。

道路交通拥堵率 (traffic congestion ratio, TCR) 综合反映特定时间段内的交通拥堵程度, 值越大, 说明拥堵程度越大, 具体计算方法如式(20)所示。

$$R_{TCR} = \frac{\sum_{j=1}^J I_{TPI,j}}{\sum_{t=1}^T I_{TPI,t}} \quad (20)$$

1.4 城市配电网层

15) 电压合格率。

电压合格率 χ 反映充电服务网负荷接入引起配电网系统电压的波动情况, χ 可反映供电电能质量, 具体计算方法如式(21)所示。

$$\chi = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \leq \varphi_{\max} \quad (21)$$

式中: U_N 为配电网线路运行的额定电压; φ 反映了配电网线路实际电压 U 与额定电压 U_N 的偏差。

16) 节点电压越限量。

节点电压越限量 M_U 反映充电网运行前后引起配电网节点电压越限的数量变化, 计算方式如式(22) — (23)所示。

$$M_U = \sum_{i=1}^n \gamma_i - \sum_{i=1}^n \gamma_{i0} \quad (22)$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & U_i \geq U_N \\ 0, & 0 \leq U_i < U_N \end{cases} \quad (23)$$

式中: γ_{i0} 为充电网运行前配电网节点电压越限数量; γ_i 为充电网运行后配电网节点电压越限数量; U_i 为节点*i*的电压。

17) 配电网网络损耗成本。

配电网网络损耗成本 P_{loss} 用于评估配电网的经济运行效果, 由总网损间接反映:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} R_i \quad (24)$$

式中: P_i 和 Q_i 为节点*i*的有功和无功功率; R_i 为支路的阻值。

18) 负荷峰谷差变化量。

负荷峰谷差变化量 ΔP 反映充电服务网充电负荷对配电网负荷特性的影响。

$$\Delta P = (P_{\max} - P_{\min}) - (P_{\max}^0 - P_{\min}^0) \quad (25)$$

式中: P_{\max}^0 和 P_{\min}^0 分别为充电服务网运行前日负荷最大值和最小值; P_{\max} 和 P_{\min} 分别为充电网运行后日负荷曲线的最大值和最小值。

2 基于灰色关联综合评价法的充电服务网评估

2.1 权重确定

合理的指标权重对于综合评价结果的准确性有决定性作用^[18-19]。多维指标评估体系赋权法包括主观赋权法和客观赋权法。主观赋权易受决策者个人经验影响, 客观赋权可能与专家的认识相悖。为克服上述方法的劣势, 采用组合赋权法, 将层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 和熵值法结合确定指标层指标的权重, 准则层权重基于AHP的主观赋权法确定。式(26)为组合权重的计算方法。图2为采用组合赋权法确定权重的流程图。

$$W = w_{AHP,n} w_{E,n} / \left(\sum_{n=1}^q w_{AHP,n} w_{E,n} \right), \quad n = 1, 2, \dots, q \quad (26)$$

式中: $w_{AHP,n}$ 和 $w_{E,n}$ 分别为主观权重和客观权重。

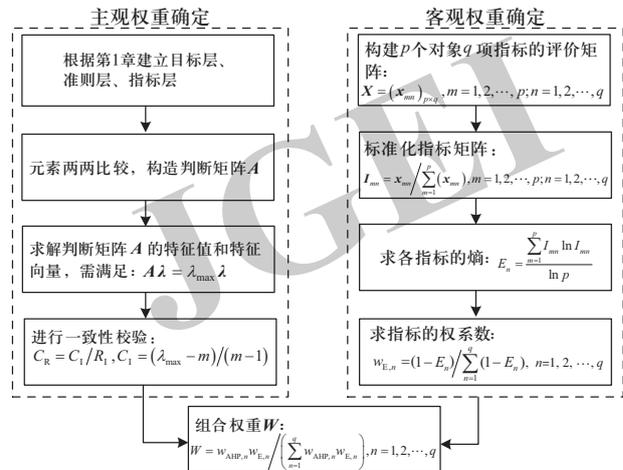


图2 主客观权重确定流程图

Fig. 2 Flow chart of subjective and objective weight determination

2.1.1 主观权重确定

采用AHP确定主观权重, 求解步骤如下:

1) 确立各层因素关联关系和隶属关系, 建立递阶

层次结构:

- 2) 构造判断矩阵;
- 3) 求解特征值和特征向量;
- 4) 一致性校验。

2.1.2 客观权重确定

采用熵值法确定客观权重。熵值法^[10]是一种依据各指标值所包含的信息量的多少确定指标权重的客观赋权法, 指标的熵值越大, 提供的信息量少, 在综合评价中的作用小, 那么该指标占据的权重小。运用熵值法从客观角度计算充电服务网评价指标体系准则层的权重。熵值法确定客观权重的步骤描述如下:

- 1) 构建具有 p 个对象的 q 项指标的评价矩阵:

$$X = (x_{mn})_{p \times q}, \quad m = 1, 2, \dots, p; n = 1, 2, \dots, q \quad (27)$$

- 2) 标准化指标矩阵 I :

$$I_{mn} = x_{mn} / \sum_{m=1}^p x_{mn}, \quad m = 1, 2, \dots, p; n = 1, 2, \dots, q \quad (28)$$

- 3) 计算各指标的熵值 E_n :

$$E_n = \left(\sum_{m=1}^p I_{mn} \ln I_{mn} \right) / \ln p \quad (29)$$

- 4) 计算各指标的权系数 $w_{E,n}$:

$$w_{E,n} = (1 - E_n) / \sum_{n=1}^q (1 - E_n), n = 1, 2, \dots, q \quad (30)$$

2.2 多层次灰色关联综合评价

基于多层次灰色关联法确定城市充电服务网充电建设方案的优劣性, 以处理系统信息的不完全明确性, 该方法准确性高^[20-21], 具体步骤如下。

步骤1: 将准则层指标集 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 分成 p 个子集 $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iq}\}$, $i = 1, 2, \dots, p$, 且 $X = \sum_{i=1}^p X_i$ 。

步骤2: 对指标层数据规范化处理, 处理后为 X_1, X_2, \dots, X_m , $X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $X_0 = \{1, 1, \dots, 1\}$ 。按照式(31) — (34) 计算 X_0 与 X_i 关于第 k 个元素的关联系数。

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho\Delta_{\max}}, i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (31)$$

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (32)$$

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (33)$$

$$\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (34)$$

式中: ρ 为分辨系数, 取0.5。

步骤3: 计算指标层的灰色关联评估结果。按照式(35) — (36) 计算指标层的灰色关联分析结果 B_i 。

$$B_i = w_i R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}) \quad (35)$$

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_q), \sum_{j=1}^q w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, q \quad (36)$$

式中: w 为指标层各因素的权重向量; R_i 为 x_i 的灰色关联系数矩阵。

步骤4: 计算准则层灰色关联综合评价结果。根据指标层灰色关联结果构造灰色关联度矩阵 \hat{R} , 权重向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_p)$, 得到准则层灰色关联评价结果 B 。充电服务网评估流程如图3所示。

$$B = W\hat{R} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (37)$$

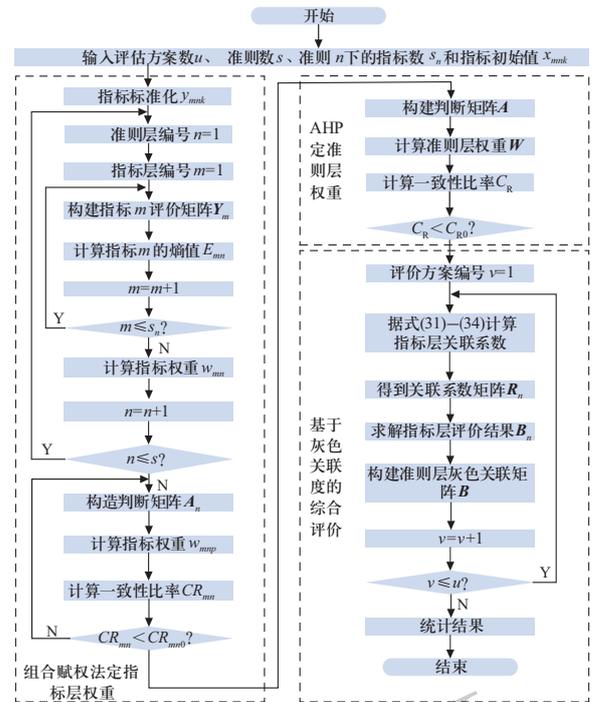


图3 充电服务网评估流程图

Fig. 3 Flow chart of evaluation of charging service network

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{p1} & b_{p2} & \dots & b_{pm} \end{bmatrix} \quad (38)$$

3 算例分析

3.1 算例描述

某地区路网共有28个节点, 假设该地区拥有私家电动汽车10 000辆, 充电站接入15 kV 54节点配电网如附录A表A1所示(方案1—方案5)。采用文献[22]的仿真模型获取评估数据源, 运用仿真模型数据验证所提模型和方法的可行性, 运用仿真模型数据源可计算各指标初值如附录A表A3所示。同时以西南地区某城

市已投运的充电站作为评估对象，站内初始数据计算值如附录A表A2所示。以下节点均指交通网节点。

设置5个方案，方案1选择将充电站放置在节点7、节点8、节点11、节点13、节点19；方案2将充电站放置在节点7、节点8、节点11、节点13、节点22；方案3将充电站放置在节点7、节点11、节点13、节点16、节点22；方案4将充电站放置在节点8、节点11、节点13、节点19、节点22；方案5将充电站放置在节点11、节点16、节点18、节点19、节点22。充电站建设方案的充电机台数配置情况如附录A表A1所示。交通网节点与配电网节点配对情况如附录A表A4所示。

根据国家标准《GB/T 29107—2012 道路交通信息服务 交通状态描述》^[23]，道路等级 G 、道路拥堵系数 α 与TPI的转换关系如表1所示。

表1 参数转换关系表

Table 1 Conversion relationship of parameters

通行速度 V_{ij} / (km·h ⁻¹)	TPI	道路等级 G	拥堵系数 α
>40	[0, 2)	G_1	0
(30, 40]	[2, 4)	G_2	0
(20, 30]	[4, 6)	G_3	0
[15, 20]	[6, 8)	G_4	1
<15	[8, 10]	G_5	1

3.2 仿真分析

采用问卷调查的方式邀请行业专家对准则层和指标层中的指标进行两两对比得到相对重要性，由此构造原始判断矩阵，基于AHP计算各层指标权重，准则层权重计算结果如表2所示。

表2 AHP准则层权重

Table 2 Weights of AHP criteria level

充电服务网	用户体验	交通网	配电网
0.475 8	0.317 4	0.098 1	0.108 7

基于AHP计算指标层各个指标权重，得到指标层主观权重结果为

$$\begin{cases} W_{AHP-B1} = (0.546\ 4, 0.270\ 0, 0.100\ 2, 0.083\ 4) \\ W_{AHP-B2} = (0.493\ 8, 0.129\ 8, 0.230\ 1, 0.146\ 3) \\ W_{AHP-B3} = (0.184\ 6, 0.198\ 9, 0.516\ 2, 0.100\ 3) \\ W_{AHP-B4} = (0.218\ 2, 0.243\ 4, 0.377\ 9, 0.160\ 5) \end{cases} \quad (39)$$

基于熵值法计算指标层权重，对由AHP计算的指标层指标权重进行修正，根据式(26)求得各指标层

指标的组合权重如式(40)所示。

$$\begin{cases} W_{B1} = (0.757\ 2, 0.198\ 4, 0.024\ 1, 0.020\ 3) \\ W_{B2} = (0.721\ 9, 0.047\ 7, 0.167\ 8, 0.062\ 6) \\ W_{B3} = (0.099\ 9, 0.107\ 5, 0.764\ 2, 0.028\ 5) \\ W_{B4} = (0.166\ 9, 0.222\ 5, 0.510\ 1, 0.100\ 5) \end{cases} \quad (40)$$

对充电服务网综合评估模型指标层各指标进行单层次灰色关联评价，计算灰色关联度结果如式(41)~(44)所示。

$$y_1 = w_1 \xi_1 = (0.829\ 9, 0.428\ 0, 0.572\ 5, 0.622\ 8, 0.783\ 8) \quad (41)$$

$$y_2 = w_2 \xi_2 = (0.364\ 1, 0.734\ 1, 0.473\ 4, 0.221\ 8, 0.722\ 4) \quad (42)$$

$$y_3 = w_3 \xi_3 = (0.351\ 7, 0.541\ 4, 0.899\ 2, 0.489\ 9, 0.851\ 7) \quad (43)$$

$$y_4 = w_4 \xi_4 = (0.427\ 0, 0.901\ 3, 0.710\ 9, 0.609\ 9, 0.831\ 2) \quad (44)$$

将指标层指标的关联度计算结果进行加权求取综合关联度结果如式(45)所示。

$$\gamma = (0.576\ 4, 0.580\ 0, 0.577\ 8, 0.469\ 9, 0.762\ 0) \quad (45)$$

图4为5种不同充电站建设方案在充电网运行、电动汽车用户体验、交通网运行和配电网运行4个维度的关联分析结果，各方案的最终评分结果如式(45)所示。由分析结果可知，充电站规划方案5较其他方案更优，充电站规划建设优选方案排序为：方案5>方案2>方案3>方案1>方案4。

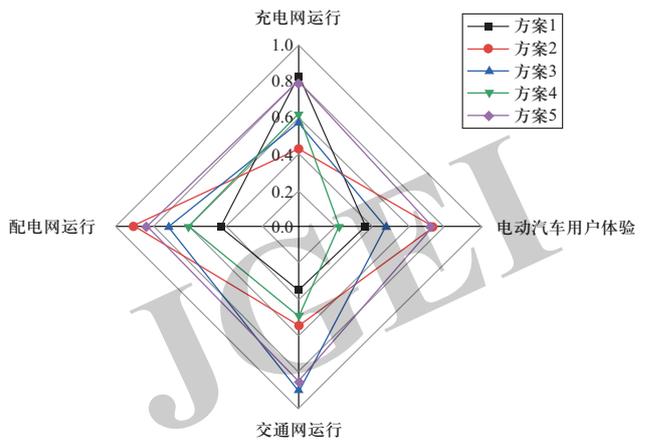


图4 评估结果雷达图

Fig. 4 Radar chart of assessment results

根据式(41)~(44)准则层灰色关联度计算结果，方案1在充电网运行水平最优，但是综合评估结果较差，这是由于方案1对交通运行影响较为恶劣，且带给用户的体验感较差，说明各层的运行评估结果都对最终关联度产生影响；方案2在用户体验维度评估结果高，电动汽车用户充电体验较好且对配电网运行产

生的影响较小; 方案3在交通运行方面评估结果更优; 方案4整体评分结果差; 方案5在充电网运行层、电动汽车用户体验层和配电网运行层的评估结果较好, 为最佳规划备选方案, 但是, 方案5仍会引起路段交通堵塞, 在后期的充电站建设规划中, 为缓解交通压力, 可考虑在非拥堵路段建设充电站, 同时, 可对电动汽车用户实施充电引导策略, 以提升充电服务网整体运行的均衡性。

3.3 充电服务网评估诊断

根据该地区充电站运行数据, 对现有充电站的运行进行评估诊断, 以验证模型的可实施性, 并针对性提出改进措施, 为该区域后续充电站的选址规划提供参考。

选取4个充电站, 分别为充电站A、B、C、D各个充电站地理位置分布如附录B图B1所示。选取的充电站在充电服务网运行层、电动汽车用户体验层、交通网运行层和配电网运行层的关联结果如附录B图B2所示, 综合灰色关联度评估结果如表3所示。

表3 灰色关联度结果

Table 3 Results of grey correlation degree

充电站A	充电站B	充电站C	充电站D
0.598 8	0.498 5	0.730 5	0.356 5

由表3可知, 充电站C的灰色关联度评估结果最高, 其次分别为充电站A、充电站B、充电站D。充电站C的充电负荷大, 充电站内桩的利用率高, 在充电网运行层和用户体验层评估结果高, 综合评价结果最优, 但是, 该站在交通网运行维度产生一定影响, 在后期建设中可适当考虑增加充电机数量。充电站D在交通网运行维度和配电网运行维度关联结果高, 在充电网运行维度关联度结果低, 最终灰色关联度结果评分低, 说明只有各个方面相对均衡才能实现整体最优。考虑到充电站C和充电站D在充电站运行维度的差异性, 可考虑通过制定充电服务差异价格引导部分电动汽车用户前往充电站D充电, 以此缓解充电站C的运行压力。

4 结论

本文提出基于组合赋权的灰色关联度分析法的城市充电服务网多维评估模型, 结合充电服务网层、电

动汽车用户体验层、道路交通网层和城市配电网层构建多维综合评估指标体系, 合理评估充电服务网运行效果, 挖掘其运行不良区域与薄弱环节, 为后续充电服务网的持续优质运行提供改进依据。仿真结果表明城市充电服务网评估模型和所提方法具有有效性和可行性, 可用于对城市充电站的运行效果进行综合评估诊断, 并为城市充电站后续建设提供参考依据。

参考文献

- [1] 周椿奇, 向月, 张新, 等. V2G辅助服务调节潜力与经济性分析: 以上海地区为例[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 135-141.
ZHOU Chunqi, XIANG Yue, ZHANG Xin, et al. Potential regulation ability and economy analysis of auxiliary service by V2G: taking Shanghai area for an example[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 135-141(in Chinese).
- [2] 姚颖蓓, 陆建忠, 傅业盛, 等. 华东地区电动汽车发展趋势及用电需求预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 141-145.
YAO Yingbei, LU Jianzhong, FU Yesheng, et al. Electric vehicle development trends and electricity demand forecast in East China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 141-145(in Chinese).
- [3] 臧海祥, 舒宇心, 傅雨婷, 等. 考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 59-80.
ZANG Haixiang, SHU Yuxin, FU Yuting, et al. Multi-objective planning of an urban electric vehicle charging station considering multi demand scenarios[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 59-80(in Chinese).
- [4] 国务院办公厅. 《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》[EB/OL]. (2020-11-02)[2021-10-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm.
- [5] 张程嘉, 刘俊勇, 向月, 等. 基于数据挖掘的电动汽车充电设施配置与两阶段充电优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1054-1064.
ZHANG Chengjia, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Electric vehicle charging facilities planning and its two-stage optimal charging based on data mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1054-1064(in Chinese).
- [6] 孟锦鹏, 向月, 顾承红, 等. 面向可靠性提升的电动汽车充电基础设施协同优化规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 36-50.
MENG Jinpeng, XIANG Yue, GU Chenghong, et al. Collaborative optimization planning of electric vehicle charging infrastructure for reliability improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 36-50(in Chinese).
- [7] 杨昕然, 吕林, 向月, 等. “车-路-网”耦合下电动汽车恶

- 劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 102-108.
- YANG Xinran, LYU Lin, XIANG Yue, et al. Degradation charging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under "EV-road-grid" coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 102-108(in Chinese).
- [8] 钱仲豪, 江志辉, 吴茜, 等. 计及不确定性因素的分布式电源与电动汽车充电站协调优化[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 131-137.
- QIAN Zhonghao, JIANG Zhihui, WU Xi, et al. Coordinated optimization of distributed power and electric vehicle charging stations considering uncertain factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 131-137(in Chinese).
- [9] LIU Xiaoyi, FENG Tianyuan. Energy-storage configuration for EV fast charging stations considering characteristics of charging load and wind-power fluctuation[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 48-57.
- [10] 赵胜霞, 刘俊勇, 向月, 等. 考虑配电网接纳能力的电动汽车充换电服务网基础设施配置方案分析与评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 94-101.
- ZHAO Shengxia, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Analysis and assessment considering accommodation capability of distribution network for infrastructure deployment of EV charging/swapping service network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 94-101(in Chinese).
- [11] UCER E, KOYUNCU I, KISACIKOGLU M C, et al. Modeling and analysis of a fast charging station and evaluation of service quality for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(1): 215-225.
- [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] 刘俊勇, 向月, 姚昊天, 等. 三网融合下充电服务网规划与运营探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 1-12.
- LIU Junyong, XIANG Yue, YAO Haotian, et al. Discussion on planning and operation of charging service network integrated with power and transportation networks[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 1-12(in Chinese).
- [14] 南琦琦, 穆云飞, 董晓红, 等. 电动汽车快速充电网综合评估指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 83-91.
- NAN Qiqi, MU Yunfei, DONG Xiaohong, et al. Comprehensive evaluation index system and method for fast charging network of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 83-91(in Chinese).
- [15] 刘畅, 李颖, 夏露, 等. 电动汽车充电站综合性能评价[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(1): 82-88.
- LIU Chang, LI Ying, XIA Lu, et al. Research on comprehensive performance evaluation for electric vehicles charging stations[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44(1): 82-88(in Chinese).
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 城市交通运行状况评价规范: GB/T 33171—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [17] 蒋卓臻, 向月, 刘俊勇, 等. 集成电动汽车全轨迹空间的充电负荷建模及对配电网可靠性的影响[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3789-3800.
- JIANG Zhuozhen, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Charging load modeling integrated with electric vehicle whole trajectory space and its impact on distribution network reliability[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3789-3800(in Chinese).
- [18] 吕喆, 梁延东, 王建国. 交变电磁场处理下换热器内水质参数与污垢热阻的灰色关联分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2967-2975.
- LYU Zhe, LIANG Yandong, WANG Jianguo. Grey incidence analysis between water quality parameters and fouling resistance in heat exchanger with alternating electromagnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2967-2975(in Chinese).
- [19] 王永真, 林伟, 李成宇, 等. 工业型城市能源转型的综合评价——以苏州市为例[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 188-196.
- WANG Yongzhen, LIN Wei, LI Chengyu, et al. Comprehensive evaluation of energy transition in industrial cities: a case study of Suzhou[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 188-196(in Chinese).
- [20] 周依希, 李晓明, 瞿合祚, 等. 基于AHP-灰色关联度的复杂电网节点综合脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 86-93.
- ZHOU Yixi, LI Xiaoming, QU Hezuo, et al. Node integrated vulnerability assessment of complex power grid based on AHP-grey relational degree method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 86-93(in Chinese).
- [21] 王永真, 张靖, 潘崇超, 等. 综合智慧能源多维绩效评价研究综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(3): 207-225.
- WANG Yongzhen, ZHANG Jing, PAN Chongchao, et al. Multi-dimensional performance evaluation index review of integrated and intelligent energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 207-225(in Chinese).
- [22] 向月. 考虑分布式电源和电动汽车的配电系统规划和运行研究[D]. 成都: 四川大学, 2016.
- XIANG Yue. Planning and operation of distribution system considering distributed generation and electric vehicles[D]. Chengdu: Sichuan University, 2016(in Chinese).
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 道路交通信息服务 交通状态描述: GB/T 29107—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

附录A 算例参数设置及结果

表 A1 充电站配置情况

Table A1 Configuration of charging station

方案	台										
	节点7	节点8	节点10	节点11	节点12	节点13	节点15	节点16	节点18	节点19	节点22
1	7	10		9		7					8
2	7	9		9		7					9
3	7			9		6		10			9
4		9		9		6				8	9
5				8				9	10	7	8

表 A2 原始仿真数据

Table A2 Simulation raw data

准则层	指标层	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
充电服务网层	A_U	0.72	0.65	0.64	0.70	0.69
	σ	19.18	19.21	16.24	18.44	19.16
	R	5.73	4.81	4.98	4.96	5.62
	$\Delta B_{t,t-1}$	0.36	0.33	0.32	0.30	0.34
用户体验层	X_D	0.84	0.89	0.86	0.84	0.89
	ΔL_D	2.62	2.74	2.19	2.14	2.72
	T_C	1.80	1.56	1.61	1.94	1.56
	M_{EV}	134.40	120.12	118.20	127.98	124.32
道路交通网层	ΔI_{TTI}	2.54	2.14	1.54	2.36	1.76
	ΔL	7.43	6.54	4.73	6.67	5.21
	ΔI_{TPI}	30.21	28.90	26.88	28.94	27.10
	R_{TCR}	0.47	0.27	0.36	0.38	0.34

续表

准则层	指标层	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
城市配电网层	χ	0.64	0.86	0.76	0.70	0.85
	M_U	161	119	131	171	121
	P_{loss}	1.283	0.805	0.965	1.103	0.953
	ΔP	24.3	20.1	23.4	24.1	21.3

表 A3 充电站数据

Table A3 Data of charging stations

指标	充电站A	充电站B	充电站C	充电站D
A_U	0.5	0.3	0.92	0.10
γ	0.86	0.78	0.89	0.74
$\Delta B_{t,t-1}$	0.12	0.14	0.08	0.24
T_C	1.87	1.79	2.14	1.76
M_{EV}	128.07	148.54	310.70	78.61
X_D	0.94	0.94	0.96	0.99
ΔI_{TTI}	1.34	1.21	1.41	1.10
ΔP	20.33	21.32	49.57	7.89

表 A4 节点对关系表

Table A4 Node pair relationship

交通网节点	配电网节点	交通网节点	配电网节点	交通网节点	配电网节点
7	6	12	30	18	28
8	26	13	13	19	47
10	33	15	15	22	14
11	31	16	27		

附录B 评估诊断验证案例



图 B1 充电站地理分布图
 Fig. B1 Geographical distribution of charging stations

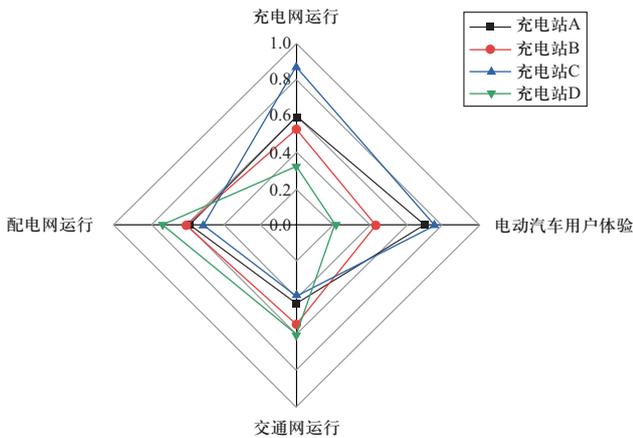


图 B2 评估结果雷达图
 Fig. B2 Radar chart of assessment results

收稿日期: 2021-11-01; 修回日期: 2022-01-11。



王敏

作者简介:

王敏 (1996), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网与电动汽车交互, E-mail: 1844574034@qq.com。

向月 (1987), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向智能电网与电动汽车交互。通信作者, E-mail: xiang@scu.edu.cn。

刘俊勇 (1963), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场, 电力系统稳定与控制, E-mail: liujy@scu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)