

引用格式:张美霞,高凌霄,杨秀.基于模糊Borda法的电动汽车负荷对配电网影响综合评估研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):67-77.

Citation: ZHANG Meixia, GAO Lingxiao, YANG Xiu. A comprehensive assessment of the electric vehicle load impact on distribution network based on fuzzy Borda method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 67-77.

# 基于模糊 Borda 法的电动汽车负荷对 配电网影响综合评估研究

张美霞, 高凌霄, 杨 秀

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘 要:** 电动汽车行业的高速发展必将对电网运行带来巨大压力, 因此需要通过电动汽车对配电网影响的精准研究得到应对之法。本文构建了电动汽车充电负荷时空分布预测模型以及电动汽车接入配电网综合评估体系。首先, 运用多源数据、多因素能耗模型、动态路网模型以及路—电耦合理论预测电动汽车充电负荷时空分布结果; 其次, 从合理性、安全性、经济性、可靠性以及环保性 5 项准则出发构建相应的量化指标, 建立综合评估体系; 最后, 运用综合赋权法得到指标权重集, 并运用模糊 Borda 法集合多种综合评估方法, 协调各评价方法对评价对象的主客观性影响从而得到综合评估结果。最后, 以上海某地区为例进行算例仿真, 验证了本文方法的可行性。

**关 键 词:** 电动汽车; 动态路网; 负荷预测; 评价体系; 模糊 Borda 法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.008 中图分类号: U469.72 文章编号: 1673-9140(2024)03-0067-11

## A comprehensive assessment of the electric vehicle load impact on distribution network based on fuzzy Borda method

ZHANG Meixia, GAO Lingxiao, YANG Xiu

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The rapid development of the electric vehicle industry will definitely bring great pressure to the power grid operation, which needs to be tackled by the precise study of the electric vehicles impact on the distribution grid. Therefore, this paper constructs a spatial and temporal distribution prediction model of EV charging load and a comprehensive evaluation system of EV access to the distribution network. Firstly, multi-source data, multi-factor energy consumption model, dynamic road network model and road-electricity coupling theory are used to predict the spatial and temporal distribution of EV charging load. Secondly, a comprehensive evaluation system is established by constructing quantitative indicators based on five criteria: rationality, safety, economy, reliability and environmental protection. Thirdly, the comprehensive weighting method is applied to obtain the index weight set, and the fuzzy Borda method is applied to synthesize various comprehensive evaluation methods in order to obtain the comprehensive evaluation results. Finally, the feasibility of the proposed method is proved by simulating a case in a region of Shanghai.

**Key words:** electric vehicles; dynamic road network; load forecasting; evaluation system; fuzzy Borda method

为积极响应碳达峰与碳中和战略目标, 新能源汽车产业作为绿色产业的重要组成部分, 产业规模不断扩大, 电动汽车(electric vehicle, EV)保有量逐

年高速增长。但鉴于 EV 时空自由度极高, 且用户充电行为的不确定性, 造成了 EV 充电负荷预测的时空不确定性<sup>[1]</sup>。而用户 EV 充电行为与基础用电

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 上海市科委项目(18DZ1203200); 上海电力人工智能工程技术研究中心项目(19DZ2252800)

通信作者: 高凌霄(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事电动汽车充电负荷对配电网的影响研究; E-mail: 1261939995@qq.com

行为特征近似导致EV充电负荷与基础负荷峰谷分布接近,因此随着EV保有量的不断激增,配电网负荷压力将不断增加,电压越限、网损过大、容量越限等问题接踵而至<sup>[2-7]</sup>。因此,构建EV充电负荷时空分布预测模型,并构建配电网对EV接纳能力评估模型,有助于进行EV发展规划、充电桩规划以及配电网优化。

学者对EV充电负荷预测方面的研究首先从统计学出发,对用户出行特征进行提取,得到其概率模型<sup>[8]</sup>,以统计学知识模拟得到符合整体规律的预测结果。再通过出行链理论将各出行特征概率模型有机串联<sup>[9-10]</sup>,结合马尔可夫理论和蒙特卡洛法得到EV充电负荷曲线<sup>[11-13]</sup>,出行链理论使得EV出行模型更具整体性与连贯性。最后构建车一路一电耦合模型,利用交通路网信息为EV充电负荷赋予空间属性<sup>[14-16]</sup>,使得EV出行模型、路网模型和电网模型有机结合,进而得到符合实际的EV充电负荷时空分布。但以上研究对于大数据的利用以及负荷预测模型的完整性仍具有局限性,尤其是实时数据的利用不够完善,而过多利用流量-速度模型等方式进行预测,会导致整体模型预测结果的精度偏差。

针对配电网对EV接纳能力方向的研究多从指标体系、权重设置以及评价方法3个层面出发。文献<sup>[17-18]</sup>以配电网安全性、合理性以及经济性准则出发,结合层次分析法以及熵权法的综合权重法得到准则层与指标层权重,最后利用综合模糊评价法进行评价。文献<sup>[19-21]</sup>从配电网可靠性出发,构建各元件可靠性参数概率模型,运用蒙特卡洛法进行EV接入后可靠性指标研究。文献<sup>[22-25]</sup>分别利用优劣解距离法、秩和比法以及模糊综合评价法建立配电网评价模型。以上研究有两方面不足:①对于指标体系较为单一,没有将传统准则与可靠性研究相结合,也没有对当前碳达峰理念进行指标化刻画;②综合权重法结合层次分析法的客观性与熵权法的主观性,使得权重设置兼顾了主客观性,但这也反映出了评价方法的单一性而导致的评价结果存在着主客观性不平衡。

针对以上不足,本文利用多源数据构建动态路网模型,全面挖掘覆盖路网、电网、用户出行习惯、区域功能性、气温以及路网车辆实时速度等信息数据。运用出行链理论、多因素能耗模型、路-电耦合模型,有机结合车-路-电,得到贴近实际的EV充电负荷时空分布预测结果,并从合理性、安全性、经济性、可靠性与环保性5个准则出发构建指标体

系,运用层次分析法与熵权法结合的综合赋权法得到权重集。采用模糊Borda法<sup>[26]</sup>综合多种评价方法的评价结果,协调主客观性从而得到最终评价结果。

## 1 EV充电负荷时空模型

基于兴趣点(point of information, POI)类别为EV车主出行目标分类<sup>[27]</sup>,共计家庭(H)、工作(W)、商业消费(C)以及公共服务(R)4类。假设各个目标节点均装设EV充电桩可进行EV充电。

### 1.1 EV出行路线模拟

根据私家车出行数据提取一天内的出行次数进行概率曲线拟合,抽取用户日出行次数,并假设首次出行起点为家。利用出行始末点构建马尔可夫状态转移矩阵,结合比例选择算法进行出行链目的地决策,该过程与中间行驶过程无关。根据出行链理论,从出行数据中提取开始行驶时刻、停车时长等EV出行时空特征量进行概率曲线拟合<sup>[28]</sup>,利用动态路网模型得到EV出行里程以及相应的出行消耗时间,从而构成EV行程链模型。本文将Dijkstra算法改进为最短行驶时间路径选择算法,进行单次目的地路径选择,该算法将途径节点的行驶时间实时预测结果作为选择度量从而选择下一目标节点。随着路径规划智能化日益发展,最短行驶时间将比最短路径更适合作为路径选择的度量依据。

### 1.2 动态路网模型

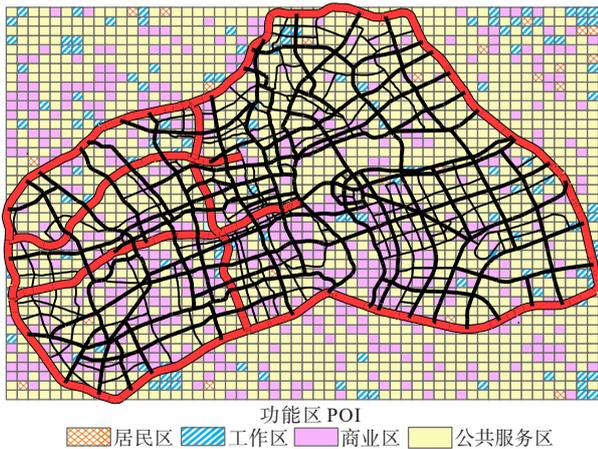
基于马尔可夫理论的EV出行目标决策方法,需要对各路网节点赋予相对应的功能区属性。利用POI爬取技术对所选路径覆盖区域进行功能区划分网格化处理,得到功能区网格图,将路网图拓扑于功能网格图,得到各自路网节点的功能区属性。本文运用高德地图POI数据爬取技术获得上海内环228 750条POI数据,结合高德地图POI分类方式将POI点分为居民区、工作区、商业区和公共服务区,分类详情如表1所示。由于POI数据点信息并没有包含地点面积、公众认知度等属性,因此需定义不同POI权重来更精准地刻画功能区分类,最后得到所需区域的功能区网格图,如图1所示。

不同的道路等级影响着道路拥堵指数、车辆行驶速度,进而影响到EV单位里程耗量。本文选取快速路、主干道和次干道作为研究对象道路等级。基于上海市中心城道路等级系统规划图并利

用 ArcGIS 软件对上海路网进行拓扑分析,以及道路等级划分可视化,如图 2 所示。城市道路等级划分依据见表 2。

**表 1** 高德地图 POI 数据功能区分类表  
**Table 1** Gaode map POI data functional area classification table

一级分类	二级分类
居民区	商务住宅
工作区	政府机构
	公司企业
商业区	餐饮服务
	购物服务
	住宿服务
	汽车服务
公共服务区	生活服务
	体育休闲服务
	医疗保健服务
	科教文化服务
	交通设施服务
	金融保险服务



**图 1** 上海内环功能区网格分类图  
**Figure 1** Grid classification map of Shanghai inner ring functional area



**图 2** 上海内环路网等级图  
**Figure 2** Grade map of Shanghai inner ring road network

**表 2** 上海道路等级划分依据表  
**Table 2** Shanghai road grade classification basis

Fclass 字段	分类
高速公路	
高速公路一连接	快速路
干道	
干道一连接	
次要道路	主干道
次要道路一连接	
主要道路	
主要道路一连接	
第三级道路	次干道
第三级道路一连接	

本文利用 ArcGIS 软件、交通态势以及气温爬取技术,为上海内环路网赋予道路长度、道路等级、节点功能区类别等静态属性,以及道路实时速度  $V_t$ 、实时温度  $T_t$  等随时间变化的动态属性。首先对上海内环路网进行拓扑,利用 ArcGIS 投影变换功能将平面路网进行空间立体投影转换,以交点为打断点进行道路处理,并得到各段道路距离。利用高德地图交通态势开源数据进行道路实时速度爬取,赋予道路实时速度属性  $V_t$ ,以时间变化为依据更新道路的车辆行驶速度。爬取气象局上海气温数据,可得到典型日(如夏季、冬季)的路网气温,以时间为依据,赋予路网不同时间刻度下的气温属性  $T_t$ 。

### 1.3 EV 出行能耗模型

#### 1.3.1 基于交通路况的 EV 能耗模型

当前研究均是通过对道路拥堵系数以及道路等级的评定,从而通过速度计算模型得到 EV 行驶速度<sup>[29]</sup>,该方法对于速度的获取会有一些的失真。本文采用数据爬虫技术得到所需路网道路各时间点的平均速度作为 EV 在该道路上的行驶速度,较之前方法更加精准,保留了每段道路的特殊性。综合路网实时速度以及路网道路等级属性,采用交通能耗因子模型计算 EV 单位里程能耗,如下:

$$E_v = \begin{cases} 0.247 + \frac{1.52}{v_1} - 0.004v_1 + 2.992 \times 10^{-5}v_1^2, & \text{快速路} \\ -0.179 + 0.004v_2 + \frac{5.492}{v_2}, & \text{主干道} \\ 0.21 - 0.001v_3 + \frac{1.531}{v_3}, & \text{次干道} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $E_v$  为 EV 在不同等级道路中以速度  $v$  行驶时

产生的单位里程能耗,  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{km}$ ;  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  分别为快速路、主干道和次干道3种道路等级下的行车速度,取每段道路上的平均行驶速度,  $\text{km}/\text{h}$ 。

### 1.3.2 考虑温度影响的额外能耗

路网区域的温度主要通过影响用户对空调启停的心理从而影响EV额外能耗量<sup>[30]</sup>,本文以空调启停概率以及受温度影响的空调能耗建立温度影响下的EV空调能耗模型。大部分对EV空调能耗的研究,忽略了制热空调对EV能耗的影响,更侧重于研究夏天空调能耗,但空调制热相较于制冷更加耗电。本文利用MATLAB软件对车载空调实验数据进行正态分布拟合,得到空调开启概率公式与受温度影响下空调能耗公式如下:

$$K_{\text{open}}(T) = \begin{cases} 1, & T \leq T_c \text{ 或 } T \geq T_h \\ \frac{15.306}{\sqrt{2\pi} \delta_c T} \exp\left(-\frac{(T - \mu_c)^2}{2\delta_c^2}\right), & 24^\circ\text{C} < T < T_h \\ \frac{18.645}{\sqrt{2\pi} \delta_h T} \exp\left(-\frac{(T - \mu_h)^2}{2\delta_h^2}\right), & T_c < T < 15^\circ\text{C} \\ 0, & 15^\circ\text{C} \leq T \leq 24^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $K_{\text{open}}(T)$  为温度  $T$  下空调开启概率;  $\mu_c$ 、 $\delta_c$  为制热启动参数的均值与方差;  $\mu_h$ 、 $\delta_h$  为制冷启动参数的均值与方差。当温度低于冷阈值  $T_c$  或者大于热阈值  $T_h$  时用户空调开启概率为1; 当温度在舒适温度区间内, 开启空调的概率为0。本文分别以  $5^\circ\text{C}$  和  $35^\circ\text{C}$  为冷阈值和热阈值, 以  $15 \sim 24^\circ\text{C}$  为舒适温度。

$$P_{\text{open}}(T) = \begin{cases} a_1 (T_{\text{set}} - T_{\text{amb}})^{b_1}, & T_{\text{amb}} < T_{\text{set}} \\ 0, & T_{\text{amb}} = T_{\text{set}} \\ a_2 (T_{\text{amb}} - T_{\text{set}})^{b_2}, & T_{\text{amb}} > T_{\text{set}} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $P_{\text{open}}(T)$  为温度  $T$  下空调开启的额外能耗功率;  $T_{\text{amb}}$  为环境温度;  $T_{\text{set}}$  为驾驶舱设定温度, 本文设定为  $22^\circ\text{C}$ ;  $a$ 、 $b$  为函数系数, 表3为式(3)中空调能耗公式函数系数  $a$ 、 $b$  具体值。

表3 空调能耗公式函数系数表

Table 3 Air conditioning energy consumption formula function coefficient table

$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$
33.47	36.69	1.324	1.084

## 2 配电网对EV接纳能力评估研究

近年来,中国新能源汽车行业高速发展,EV充电负荷增加了配电网电压偏移、电能质量下降、线路过载、损耗越限等风险,因此本文基于此现状构

建了接入EV充电负荷的配电网接纳能力综合评估体系。首先,通过对配电网合理性、安全性、经济性、可靠性和环保性5个方面建立评估体系指标,其次,运用熵权法和层次分析法对各指标进行兼顾主客观性的综合赋权。考虑评价方法近年来多运用模糊综合评价法或者优劣解距离法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)等单一评价方法,无法与综合赋权法一样兼顾主客观性,因此本文利用模糊Borda法对多种综合评价法进行综合处理,得到兼顾主客观性的评估结果。上述流程如图3所示。



图3 配电网对EV接纳能力评估流程图

Figure 3 Flow chart of electric vehicle acceptance capacity assessment for distribution network

### 2.1 配电网对EV接纳能力综合评估指标

本文从合理性、安全性、经济性、可靠性和环保性5个方面出发选取9项指标,建立配电网接纳EV能力评估指标体系,如图4所示。

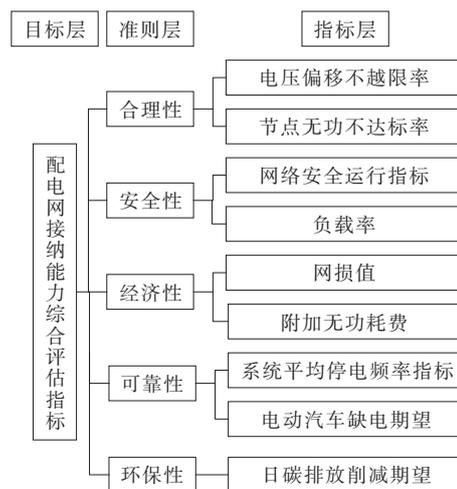


图4 配电网接纳EV能力评估指标体系

Figure 4 Index system of electric vehicle acceptance capacity assessment for distribution network

1) 合理性。

电压偏移不越限率  $T_1$  如下:

$$T_1 = \frac{N_v}{N} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $N_v$ 、 $N$  分别为配电网中满足电压偏移标准的节点数和系统的节点总数。

节点无功不达标率  $T_2$  如下:

$$T_2 = \left(1 - \frac{N_q}{N}\right) \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $N_q$ 、 $N$  分别为配电网中满足电压偏移标准的节点数和系统的节点总数。

2) 安全性。

安全载流线路达标率  $S_1$  如下:

$$S_1 = \frac{L_{out}}{L} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $L_{out}$ 、 $L$  分别为配电网中超出网络中最大电流安全运行区间的线路数和线路总数。

负载率  $S_2$  如下:

$$S_2 = \frac{P_{av}}{P_{max}} \times 100\% \quad (7)$$

式中,  $P_{av}$ 、 $P_{max}$  分别为配电网中短时平均负荷与产生的最大负荷峰值。

3) 经济性。

网损值  $E_1$  如下:

$$E_1 = \sum (P_i^2 + Q_i^2) \cdot \frac{R_i}{U_i^2} \quad (8)$$

式中,  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为线路  $i$  的有功与无功功率;  $R_i$  为线路  $i$  及其相连设备的电阻;  $U_i$  为线路  $i$  的电压。

附加无功耗散  $E_2$  如下:

$$E_2 = \eta \cdot Q_{need} \quad (9)$$

式中,  $\eta$  为补偿单位容量的无功补偿时所必需投资;  $Q_{need}$  为 EV 接入后所需的无功补偿容量。

4) 可靠性。

可靠性指标计算流程如图 5 所示。

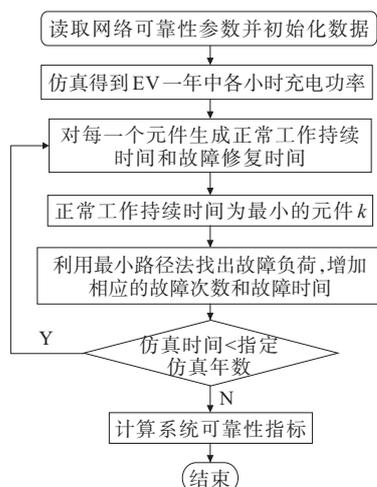


图5 可靠性指标计算流程图

Figure 5 Flow chart of reliability index calculation

系统平均停电频率指标  $R_1$  如下:

$$R_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (10)$$

式中,  $x_i$  为负荷点  $i$  的平均故障率;  $N_i$  为负荷点  $i$  的供电用户数。

EV 缺电期望  $R_2$  如下:

$$R_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} \cdot P_{ij} \quad (11)$$

式中,  $T_{ij}$  为第  $i$  辆 EV 第  $j$  次停电对应的充电缺失时间;  $P_{ij}$  为第  $i$  辆 EV 第  $j$  次停电对应的充电功率;  $m$ 、 $n$  分别为一天内系统停电次数和一天内总 EV 车辆数。

5) 环保性。

本文通过每日 EV 相较于燃油车碳排放减量刻画 EV 接入配电网后整体系统环保性改善程度。首先, 通过汽油完全氧化方程式、汽油密度以及每百公里燃油车汽油消耗量得到每百公里燃油车碳排放量为  $15\,778\text{ g}^{[31]}$ ; 其次, 通过每千瓦时供电煤消耗量以及每百公里耗电量, 并计及火电厂占比、厂用电耗比以及充电损耗比, 最终得到每百公里 EV 碳排放量为  $9\,544.8\text{ g}$ 。利用每百公里碳排放量代入用户日全轨迹出行模型得到燃油车以及 EV 日碳排放量预测值; 最终, 得到 EV 接入配电网环保性指标。

日碳排放减量  $P_1$  如下:

$$P_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (C_{FV} - C_{EV}) \cdot M_{ij} \quad (12)$$

式中,  $C_{FV}$  为每百公里燃油车碳排放量;  $C_{EV}$  为每百公里 EV 碳排放量;  $M_{ij}$  为第  $i$  辆车第  $j$  次出行的百公里行驶里程;  $m$ 、 $n$  分别为一天内特定车辆的出行次数和一天内出行车辆数。

## 2.2 均衡主客观性的综合赋权

熵权法聚焦于数据本身的信息量, 更注重数据的客观性, 通过引入信息熵概念刻画指标的离散程度, 熵值越小表示其离散程度越大, 则说明该指标在综合评估体系中的权重越大。主要步骤如下: ① 将输入矩阵转化为非负区间矩阵; ② 得到所有指标对应的各方案比重, 作为相对熵计算中用到的概率; ③ 计算每个指标的信息熵, 计算信息效用值, 并归一化得到每个指标的熵权。

本文运用层次分析法进行主观赋权, 顾名思义该方法需要对除第一层之外的每一层从属于上一层的同层因素构建判断矩阵。为确保准确度, 利用 1—9 标度方法对因素进行两两比较得到其判断矩阵。但基于主观性存在判断误差, 因此用最大特征值对应的特征向量作为被比较因素对上层某因素影响程度的权向量, 其不一致程度越大, 引起的判

断误差越大。最后对判断矩阵进行一致性检验:计算判断矩阵的检验系数  $C_R$ 。如果检验系数小于 0.1,则说明该判断矩阵通过了一致性检验,否则需要进行调整。

$$C_R = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)R_1} \quad (13)$$

式中, $n$ 为判断矩阵的维数; $R_1$ 为平均随机一致性指标,其取值根据不同的矩阵阶数取值不同。

最终将各项指标的主客观权重进行相乘并经过归一化处理得到综合权重。

### 2.3 基于模糊 Borda 法的接纳能力评估方法

#### 2.3.1 模糊综合评价法

为得到非确定性问题的清晰直观评价结果,模糊综合评价法运用隶属度理论得到较之定性评价更具精准性与系统性的定量评价。建立 3 种模糊集合,分别为影响评价方案的因素集合、评价方案可能得到的评语组成的评价集合以及由综合赋权法得到的权重集合。利用隶属函数得到因素集相对应的隶属度组成模糊综合评价矩阵,并结合模糊综合评价矩阵与权重集合得到最终的隶属向量。

#### 2.3.2 秩和比综合评价方法

对效益型指标以及成本型指标分别进行从小到大和从大到小的序号编秩,若是存在相等数值,则赋予相同序号,由于本文已将各指标进行正向处理,因此选用效益型指标编秩制方法,如下:

$$R_{ij} = 1 + (n-1) \cdot \frac{X_{ij} - \min(X_{1j}, X_{nj}, \dots, X_{nj})}{\max(X_{1j}, X_{nj}, \dots, X_{nj}) - \min(X_{1j}, X_{nj}, \dots, X_{nj})} \quad (14)$$

式中, $R_{ij}$ 为第  $i$  个方案的第  $j$  次指标的秩; $X_{ij}$ 为第  $i$  个方案的第  $j$  次指标的数值。

再结合综合权重计算加权秩和比,计算方法如下:

$$W_{RSRi} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m W_j R_{ij} \quad (15)$$

式中, $W_{RSRi}$ 为第  $i$  个方案加权秩和比秩; $W_j$ 为第  $j$  次指标的综合权重。

再编秩得到加权秩和比频率分布表,通过各组频数得到各组的累计频数以及累计频率,进而转化为概率单位,以得到的概率单位以及加权秩和比分别为自变量和因变量计算直线回归方程。最终根据直线回归方程所推算的加权秩和比对各评价方案进行分档排序。

#### 2.3.3 优劣解距离法

首先对数据矩阵进行正向化处理,即将数据处理为效益型指标(数值越大越好),并对正向化矩阵进行规范化处理从而消除量纲对指标矩阵的影响,结合规范化矩阵与综合权重向量得到加权规范阵。取各指标在每个方案中的最大值以及最小值作为各指标的正、负理想解,并利用公式求得各方案与正、负理想解的欧氏距离:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_j^+ - c_{ij})^2} \quad (16)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_j^- - c_{ij})^2} \quad (17)$$

式(16)、(17)中, $d_i^+$ 定义为评价对象与最大值的距离; $d_i^-$ 定义为评价对象与最小值的距离; $c_j^+$ 为第  $j$  列最大值; $c_j^-$ 为第  $j$  列最小值; $c_{ij}$ 为第  $i$  行、第  $j$  列的值。

最后,利用公式求得各方案的综合指标值:

$$r_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (18)$$

$$\tilde{r}_i = r_i / \sum_{i=1}^m r_i \quad (19)$$

式(18)、(19)中, $r_i$ 为归一化前的得分; $\tilde{r}_i$ 为归一化后的得分。

#### 2.3.4 模糊 Borda 法

本文运用的综合赋权法结合了主客观性,基于此考虑模糊综合评价法中隶属函数的选用以及隶属函数自身均侧重于主观性,而秩和比法以及优劣解距离法则更侧重于从数据本身出发,更能体现方法的客观性。模糊 Borda 法可综合各评价方法特性,考虑各评价方法对方案的得分以及名次信息,引入隶属度概念有机结合各评价方法,得到具有较高优越性和合理性的评价结果。

1) 计算隶属度。隶属度的计算方法可看成是归一化,但考虑所得隶属度数值趋向于 0 时导致所乘任何数均为 0,会模糊信息量,因此将隶属度最小值设定为 0.1,如下:

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min_j\{x_{ij}\}} \times 0.9 + 0.1 \quad (20)$$

式中, $x_{ij}$ 为第  $j$  中评价方法对第  $i$  个方案的评价结果。

2) 计算模糊频数以及模糊频率。首先构建体现不同评价方法下各方案名次的 0-1 矩阵  $\delta$ ,将第  $j$  种评价方法中第  $i$  个方案的名次数相应位置的 0 替换为 1,如下:

$$\delta_{ih}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{第 } j \text{ 种评价方法对} \\ & \text{第 } i \text{ 个方案的排名为 } h \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

结合 0—1 矩阵  $\delta$  和隶属度到第  $h$  种方案得到第  $h$  名评价结果的模糊频数,如下:

$$f_i = \delta_i \cdot u_i \cdot E \quad (22)$$

式中,  $f_i$  为第  $i$  种方案的模糊频数;  $E = (1, 1, \dots, 1)_{1 \times n_0}^T$ 。

最后,将模糊频数转换为模糊频率:

$$\omega_{ih} = \frac{f_{ih}}{\sum_{h=1}^n f_{ih}} \quad (23)$$

式中,  $f_{ih}$  为第  $i$  种方案排名为  $h$  时的模糊频数;  $\omega_{ih}$  为第  $i$  种方案排名为  $h$  时的模糊频率。

3) 得到名次转换分。计算方案排名为  $h$  时的转换分:

$$Q_h = \frac{1}{2} (n - h)(n - h + 1) \quad (24)$$

式中,  $Q_h$  为排名为  $h$  时的转换分;  $n$  为方案总个数。

4) 得到评价结果。利用模糊频率以及排名转换分计算各方案的模糊 Borda 分,根据高分优选原则得到全部方案的最终评价结果排名。

$$F_i = \sum_{h=1}^n \omega_{ih} Q_h \quad (25)$$

式中,  $F_i$  为第  $i$  个方案的模糊 Borda 分。

### 3 算例分析

本文仿真思路整体流程如图 6 所示。

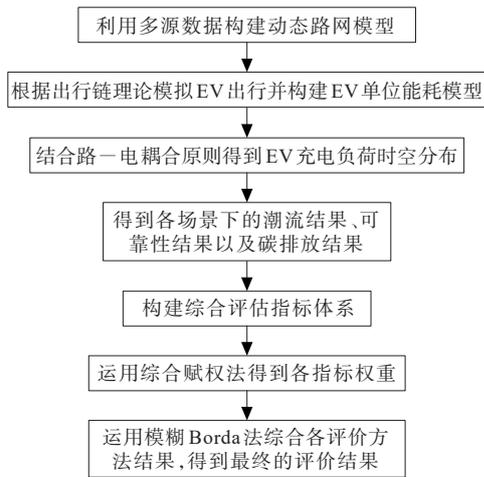


图 6 整体流程图

Figure 6 Overall flow chart

#### 3.1 EV 负荷预测算例分析

本文选取上海内环作为 EV 负荷预测目标区域,利用 Python 数据爬取技术,爬取该地区 POI 数

据、同一天内上海实时温度和各路段车辆实时平均速度,并利用 OpenStreetMap 开源数据以及 ArcGIS 软件制作上海内环路网图,得到各路段等级及其对应路程。基于以上数据进行功能区网格化处理以及路网构建等处理方法,对于各路段赋予其对应时空属性并形成路网字典集,最终构建出动态路网模型。结合近年来 EV 直流充电技术的不断发展,本文设置居民区慢充功率为 7 kW,快充功率为 15 kW,工作区、商业区以及公共服务区慢充功率为 15 kW,快充功率为 60、120 kW。选用结合私家车以及出租车的网约车出行数据,其出租车与私家车占比分别为 21.56% 与 78.44%。而查阅文献可知电动公交车充电负荷占比以稳定的波动形式持续,因此本文以 1%~9% 的随机占比接入电动公交车充电负荷<sup>[32]</sup>。综合考虑安全性、合理性、经济性、可靠性以及环保性指标,需要综合潮流计算以及可靠性指标计算方法,因此在 RBTS Bus6 F4 馈线基础上进行优化处理,使其适用于本课题仿真实验。根据邻近性、主次性、有限性路电耦合原则进行路网节点与配电网节点适配,最终得到 EV 充电负荷时空分布结果, EV 充电负荷曲线如图 7 所示,对应时空分布三维图如图 8 所示。

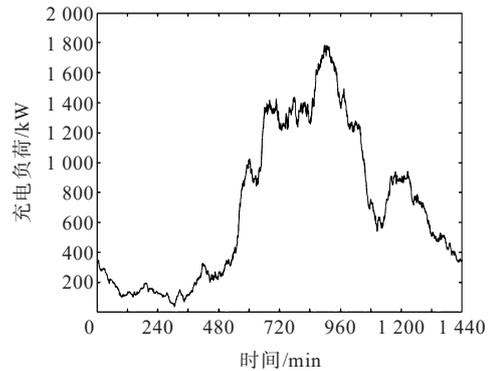


图 7 EV 充电负荷曲线预测结果

Figure 7 EV charging load curve prediction results

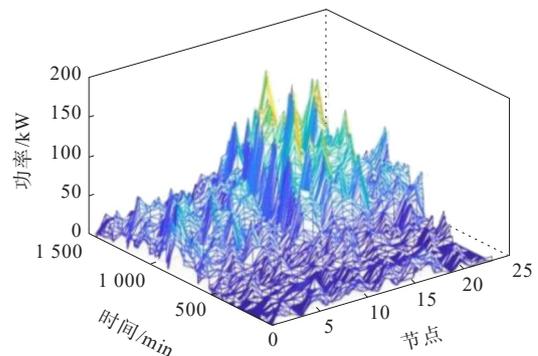


图 8 EV 充电负荷时空分布预测结果

Figure 8 EV charging load spatial and temporal distribution prediction results

EV充电负荷在09:00时激增,在16:00左右到达顶峰并开始削减,直到18:00又开始上升,20:00至21:00到达一日内EV充电负荷的次峰。由此负荷特性可推测,其与基础负荷趋势相近,若EV保有量继续呈高速增长将会对电网运行造成不可忽视的影响。

### 3.2 基于模糊Borda法的评估体系

#### 3.2.1 参数设置

本文利用EV充电负荷预测结果峰值负荷作为仿真负荷接入改进后的仿真实验配电网,基于对上海占地面积、用电负荷与本文所研究配电网进行对比分析,以及对EV大规模集中充电对配电网的影响的考虑,分别设置了以下8种方案:

方案1、3、5、7分别以5 000、3 000、1 500和

500辆EV以负荷预测时空分布结果接入配电网各节点;

方案2、4、6、8分别以5 000、3 000、1 500和500辆EV以负荷预测时空分布结果集中接入配电网5个节点。

#### 3.2.2 结果分析

本文从合理性、安全性、经济性、可靠性和环保性5项准则,共计电压偏移不越限率、节点无功不达标率、安全载流线路达标率、负载率、网损值、附加无功耗费、系统平均停电频率指标、EV缺电期望、日碳排放减量9项指标对上述8种方案进行仿真实验,结果数据如表4所示。

为消除量纲对评价结果的影响,将上述指标实验数据进行标准化,标准化结果如表5所示。

表4 各方案评估指标仿真结果数据

Table 4 Data table of simulation results for each scenario evaluation index

方案	$T_1$	$T_2$	$S_1$	$S_2$	$E_1$	$E_2$	$R_1$	$R_2$	$P_1$
1	0.233	0.967	0.066 7	0.546	0.298	3.600	0.987	6.796	415.63
2	0.167	0.967	0.100 0	0.244	0.318	4.360	0.991	6.997	409.76
3	0.433	0.900	0	0.577	0.179	5.329	0.987	4.084	257.53
4	0.367	0.933	0	0.300	0.188	5.436	0.990	4.112	254.89
5	0.633	0.900	0	0.700	0.116	8.800	0.986	2.042	131.26
6	0.633	0.867	0	0.412	0.120	8.173	0.990	2.066	130.09
7	0.800	0.733	0	0.728	0.085	17.310	0.986	0.679	43.85
8	0.800	0.767	0	0.587	0.085	16.300	0.988	0.692	43.85

表5 各方案评估指标规范化数据表

Table 5 Normalized data table of evaluation indicators for each program

方案	$T_1$	$T_2$	$S_1$	$S_2$	$E_1$	$E_2$	$R_1$	$R_2$	$P_1$
1	0.104 3	1	0.33	0.624 0	0.085 8	1	0.909 1	0.031 8	1
2	0	1	0	0	0	0.944 6	0	0	0.984 2
3	0.421 1	0.714 3	1	0.687 0	0.596 6	0.873 9	0.931 8	0.461 1	0.574 8
4	0.315 8	0.857 1	1	0.114 5	0.557 9	0.866 1	0.159 1	0.456 6	0.567 7
5	0.736 8	0.714 3	1	0.941 6	0.867 0	0.620 7	0.977 3	0.784 2	0.235 1
6	0.736 8	0.571 4	1	0.345 8	0.849 8	0.666 4	0.250 0	0.780 4	0.232 0
7	1	0	1	1	1	0	1	1	0
8	1	0.142 9	1	0.707 9	1	0.073 7	0.500 0	0.998 0	0

综合熵权法与层次分析法得到的主客观综合赋权结果如表6所示。

本文运用优劣解距离法、秩和比法和模糊综合评价法得到8种方案的得分如图9所示,可知,虽然各评价法所得到的方案得分具体数值以及相应波

动有所差异,但整体的趋势相近,各方案得分排名一致。

最后,利用模糊Borda法对3种评价方法的得分进行综合处理,得到8种方案的综合排名,排名如表7所示。

表 6 各指标综合权重值

**Table 6** Combined weight value of each indicator

指标	权重	指标	权重
$T_1$	0.138 1	$E_2$	0.026 6
$T_2$	0.021 4	$R_1$	0.024 2
$S_1$	0.250 9	$R_2$	0.234 6
$S_2$	0.074 5	$P_1$	0.147 7
$E_1$	0.081 9		

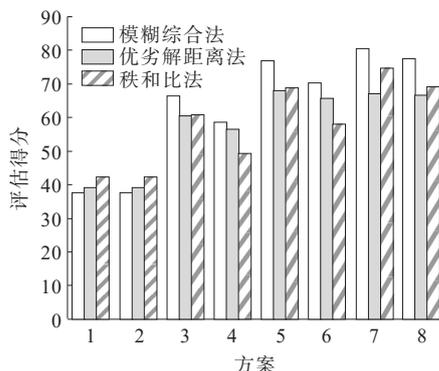


图 9 各方案评价得分柱状图

Figure 9 Histogram of evaluation scores for each program

表 7 各方案综合排名结果

**Table 7** Overall ranking results of the programs

方案	排名	方案	排名
1	7	5	3
2	8	6	4
3	5	7	1
4	6	8	2

对比 3 种评价方法所得排名与综合排名可知,综合排名与分排名一致,可得各评价方法均可应用于该评价体系,而由模糊 Borda 法得到的方案综合排名可综合体现各评价方法所得方案排名趋势。

运用优劣解距离法、秩和比法和模糊综合评价法对各方案得出准则层得分,并将所得结果代入模糊 Borda 评价模型,得到各方案最终的准则层得分,其相应的雷达图如图 10 所示。

首先,从 EV 充电规模对评估结果的影响出发进行分析,当节点充电集中性一致时,评估得分随着 EV 充电规模的增大而不断降低,且随着 EV 充电规模的增大对应的方案间得分差距越发明显。其次, EV 充电集中度对评估结果带来负面效果,同等充电规模下充电集中度较高的方案评估得分明显较低,且 EV 充电规模越大对应的充电集中度对评估结果的影响越明显。最后,从准则层方面出发,合理性、安全性、经济性与可靠性四大准则得分趋势较为一致,整体都是规模大时得分较低,即规模越大对配电网的负面影响会加重,而环保性正好

相反,规模较大时对应的得分也高,随着 EV 渗透率的增长,碳减排工作将得到有效进展。

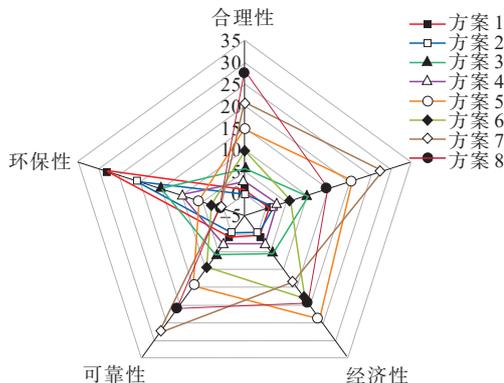


图 10 基于模糊 Borda 法的各方案准则层得分雷达图

Figure 10 Radar plot of each scheme's criterion level score based on the fuzzy Borda method

### 4 结语

本文在私家车出行数据、车辆实时路段速度、上海路网数据、气象网数据以及 POI 数据等多源数据基础上,以出行链理论为基本结构,结合动态路网模型、基于交通的 EV 能耗模型以及基于温度的额外能耗模型构建 EV 负荷时空预测模型。本文在传统评估体系基础上,结合可靠性模拟法和碳达峰理念,构建兼顾可靠性和环保性的综合评价指标体系。由于各评价方法存在无法兼顾数据客观性以及作者主观性的缺点,本文运用模糊 Borda 法综合多种评估方法,并运用兼顾主客观性的综合权重法确定各指标权重,得到最终的评估结果。可应用于 EV 充电优化方案、充电站规划优化方案以及配电网优化方案中,对各方案评估打分,得到最优的优化方案。

1) 考虑温度、交通等因素,综合多源数据构建动态路网,以动态路网模型作为 EV 出行模拟,使得 EV 负荷时空分布结果更具有空间和时间上的综合性。而多源数据尤其是实时数据的利用,使得预测结果更符合实际。

2) 由评价结果可知, EV 充电规模比接入节点集中度对配电网造成的影响更明显。随着 EV 充电规模的扩大, EV 充电规模以及充电节点接入情况对配电网影响逐渐提升。

3) EV 充电规模过大或者接入节点集中的方案,对配电网在合理性、安全性、经济性以及可靠性方面造成负面影响,而环保性指标随着 EV 规模的扩大,其碳排放量减小,准则指标结果得到正向提升。

## 参考文献:

- [1] HU J J, MORAIS H, SOUSA T, et al. Electric vehicle fleet management in smart grids: a review of services, optimization and control aspects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 56: 1207-1226.
- [2] 陈丽丹, 张尧. 电动汽车随机充电对配电网影响的研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(1): 62-69.  
CHEN Lidan, ZHANG Yao. Study on the influence of electric vehicles random charging on distribution network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(1): 62-69.
- [3] 宋辉, 徐永海. 规模化电动汽车充电对配电网电压质量的影响及其对策[J]. *现代电力*, 2017, 34(3): 30-35.  
SONG Hui, XU Yonghai. Impact of large-scale electric vehicle charging on voltage quality of distribution network and relevant countermeasures[J]. *Modern Electric Power*, 2017, 34(3): 30-35.
- [4] 李雪, 陈豪杰, 杜大军. 多时段及变量相关情形下电动汽车充/放电对有源配电网电压水平影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(2): 526-536+683.  
LI Xue, CHEN Haojie, DU Dajun. Study on the impact of charging/discharging strategy of electric vehicles on voltage level of active distribution system considering multi-period and variable correlations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(2): 526-536+683.
- [5] 何晨可, 朱继忠, 刘云, 等. 计及碳减排的电动汽车充换储一体站与主动配电网协调规划[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(1): 92-111.  
HE Chenke, ZHU Jizhong, LIU Yun, et al. Coordinated planning of electric vehicle charging-swapping-storage integrated station and active distribution network considering carbon reduction[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(1): 92-111.
- [6] 佟曦, 侯朗博, 孙昊, 等. 高比例光伏和电动汽车接入配电网的无功优化[J]. *智慧电力*, 2023, 51(10): 31-37+102.  
TONG Xi, HOU Langbo, SUN Hao, et al. Reactive power optimization of distribution networks with high proportion of PV and EVs[J]. *Smart Power*, 2023, 51(10): 31-37+102.
- [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] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. *电网技术*, 2010, 34(11): 126-130.  
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(11): 126-130.
- [9] XYDAS E, MARMARAS C, CIPCIGAN L M, et al. A data-driven approach for characterising the charging demand of electric vehicles: a UK case study[J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 763-771.
- [10] ARIAS M B, BAE S. Electric vehicle charging demand forecasting model based on big data technologies[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 327-339.
- [11] 许威, 吕林, 许立雄, 等. 基于马尔可夫链的电动汽车充电需求计算[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(3): 12-19.  
XU Wei, LÜ Lin, XU Lixiong, et al. Calculation of charging demand from electric vehicles based on Markov chain[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2017, 29(3): 12-19.
- [12] 范明康, 张怡, 康健, 等. 基于模糊聚类—马尔可夫链的换电站负荷预测模型[J]. *电力建设*, 2023, 44(10): 63-71.  
FAN Mingkang, ZHANG Yi, KANG Jian, et al. Fuzzy clustering-markov chain based load forecasting modeling for battery-swap stations[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(10): 63-71.
- [13] 袁小溪, 潘鸣宇, 段大鹏, 等. 基于网格划分的电动汽车充电负荷预测方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(3): 19-26.  
YUAN Xiaoxi, PAN Mingyu, DUAN Dapeng, et al. Prediction method of electric vehicle charging load based on grid division[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(3): 19-26.
- [14] 袁泉, 汤奕. 基于路—电耦合网络的电动汽车需求响应技术[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(5): 1627-1637.  
YUAN Quan, TANG Yi. Electric vehicle demand response technology based on traffic-grid coupling networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(5): 1627-1637.
- [15] 刘志强, 张谦, 朱熠, 等. 计及车—路—站—网融合的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 36-45.  
LIU Zhiqiang, ZHANG Qian, ZHU Yi, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging loads for electric vehicles considering vehicle-road-station-grid integration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 36-45.
- [16] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 城区电动汽车充电站布局规划研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(14): 181-187.  
HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Layout planning of electric vehicle charging stations in urban areas[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(14): 181-187.
- [17] 郭毅, 胡泽春, 张洪财, 等. 居民区配电网接纳电动汽车充电能力的统计评估方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(9): 2458-2464.  
GUO Yi, HU Zechun, ZHANG Hongcai, et al. A statistical

- method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2458-2464.
- [18] 陈卫,杨波,张兆云,等. 计及电动汽车充电站接入的配电网承载能力评估与优化[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 27-35+45.
- CHEN Wei, YANG Bo, ZHANG Zhaoyun, et al. Distribution networks supportability evaluation and optimization considering electric vehicles charging stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 27-35+45.
- [19] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.
- [20] 刘文霞,张敏,张建华,等. 电动汽车负荷对配电网可靠性影响的量化分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 1-6.
- LIU Wenxia, ZHANG Min, ZHANG Jianhua, et al. Reliability modeling and quantitative analysis of distribution network considering electric vehicle charging and discharging[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(4): 1-6.
- [21] 贾俊,范炜豪,吕志鹏,等. 用于电动汽车集群并网的直流变压器启动研究[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 875-882.
- JIA Jun, FAN Weihao, LÜ Zhipeng, et al. Research on startup of DC transformer for electric vehicle cluster grid-connection[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 875-882.
- [22] 任鹏,李翀,陶鹏,等. 基于加权熵TOPSIS法的电网节点脆弱度评估[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 143-149.
- REN Peng, LI Chong, TAO Peng, et al. Node vulnerability evaluation for power network based on weighted entropy TOPSIS method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 143-149.
- [23] 顾洁,王春义,牟宏,等. 秩和比法在高压配电网项目评价中的应用[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 80-86.
- GU Jie, WANG Chunyi, MOU Hong, et al. Application of rank-sum ratio in project evaluation of high voltage distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 80-86.
- [24] 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.
- [25] 安佳坤,杨书强,王涛,等. 电动汽车聚合下的微能源互联网优化调度策略[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 80-88.
- AN Jiakun, YANG Shuqiang, WANG Tao, et al. Optimal scheduling strategy for micro energy Internet under electric vehicles aggregation[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 80-88.
- [26] 苏为华,陈骥. 模糊Borda法的缺陷分析及其改进思路[J]. 统计研究, 2007, 24(7): 58-64.
- SU Weihua, CHEN Ji. The defects of fuzzy Borda method and its improvement[J]. Statistical Research, 2007, 24(7): 58-64.
- [27] 邢强,陈中,黄学良,等. 基于数据驱动方式的电动汽车充电需求预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3796-3813.
- XING Qiang, CHEN Zhong, HUANG Xueliang, et al. Electric vehicle charging demand forecasting model based on data-driven approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3796-3813.
- [28] 张美霞,孙铨杰,杨秀. 考虑多源信息实时交互和用户后悔心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 632-645.
- ZHANG Meixia, SUN Quanjie, YANG Xiu. Electric vehicle charging load prediction considering multi-source information real-time interaction and user regret psychology[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 632-645.
- [29] 邵尹池,穆云飞,余晓丹,等. “车—路—网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5207-5219+5519.
- SHAO Yinchu, MU Yunfei, YU Xiaodan, et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5207-5219+5519.
- [30] 张新城,刘志珍,侯延进,等. 考虑出行温度影响的电动汽车充电功率需求分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 124-131.
- ZHANG Xincheng, LIU Zhizhen, HOU Yanjin, et al. Analysis of charging power demand of electric vehicles considering the influence of travel temperature[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 124-131.
- [31] 曾鸣,史慧. 混合动力汽车全寿命周期成本计算模型及分析[J]. 现代电力, 2014, 31(1): 40-44.
- ZENG Ming, SHI Hui. Model and analysis on total life cycle cost estimation of hybrid electric vehicles[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(1): 40-44.
- [32] 周珊珊,林永君. 考虑充电行为的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 工业技术创新, 2022, 9(3): 120-126.
- ZHOU Shanshan, LIN Yongjun. Prediction of temporal and spatial distribution of electric vehicle charging load considering charging behavior[J]. Industrial Technology Innovation, 2022, 9(3): 120-126.