第 50 卷 第 2 期：693-705 高电压技术 Vol.50, No.2: 693-705
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231078

# 基于“车-路-站-网”信息耦合的电动汽车有序充电策略

刘丽军，陈　昌，胡　鑫，林钰芳
（福州大学电气工程与自动化学院，福州 350108）

**摘　要**：为了消解规模化电动汽车(electrical vehicle，EV)无序充电对交通路网、充电站和配电网运行稳定性带来的负面影响，提出一种基于“车-路-站-网”信息耦合的电动汽车有序充电策略。首先，构建“车-路-站-网”信息耦合模型和动态 Floyd 最短时间路径搜索模型，为 EV 用户搜寻最短耗时路径。其次，基于“车-路-站-网”实时状态预测 EV 用户选择不同路径前往各充电站快充产生的充电决策因素，通过层次分析法和改进 CRITIC 法综合 EV 用户充电决策因素的主客观权重，利用 Topsis 方法决策 EV 用户的最优充电路径。最后，提出 EV 用户慢充优化策略，对返程 EV 用户的慢充负荷进行优化，结合 EV 慢充和快充负荷，进一步实现配电网负荷的削峰填谷。仿真结果表明，所提出的 EV 有序充电策略能够同时提升“车-路-站-网”多方运行水平。
**关键词**：电动汽车；交通路网；动态 Floyd 搜索；有序充电策略；Topsis 决策

## Ordered Charging Strategy for Electric Vehicles Based on the Information Coupling of Vehicle-Road-Station-Grid

LIU Lijun, CHEN Chang, HU Xin, LIN Yufang
(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract**: In order to eliminate the negative impacts of disorderly charging of large-scale electric vehicles (EVs) on the operational stability of transportation road networks, charging stations, and distribution networks, we propose an orderly charging strategy for EVs based on “vehicle-road-station-network” (VRSN) information coupling system. Firstly, a VRSN system and a dynamic floyd shortest time path search model are constructed to find the shortest time-consuming path for EV users. Secondly, based on the real-time state of VRSN, we predict the charging decision factors for EV users to choose different paths to each charging station for fast charging, synthesize the subjective and objective weights of the charging decision factors for EV users through hierarchical analysis and the improved CRITIC method, and decide the optimal charging paths for EV users by using Topsis method. Finally, the slow charging optimization strategy for EV users is proposed to optimize the slow charging load of EV users after their return trips, and the EV slow charging and fast charging loads are combined to further realize peak shaving and valley filling of the distribution network load. Simulation results show that the proposed EV orderly charging strategy can simultaneously improve the operation level of VRSN system.
**Key words**: electric vehicles; transportation network; dynamic Floyd search; ordered charging strategy; Topsis method

## 0　引言

为加快实现“双碳”目标，缓解能源安全压力，我国极力推动电动汽车(electrical vehicle，EV)的发展[1]，截止 2023 年 6 月底，我国 EV 保有量达到 1620 万辆，占汽车总量 4.9%，纯 EV 占比达到 77.8%，EV 数量呈井喷式增长，EV 用户出行不确定性对整个交通能源系统的影响逐渐凸显[2]。大量 EV 用户的无序充电行为不但影响用户自身充电体验[3]，还容易引发交通路网(transportation road network，TRN)道路堵塞[4-5]、充电站(charging station，CS)排队拥堵[6]、配电网(distribution network，DN)压降和负荷持续增大[7-9]等问题。因此，提出一种 EV 有序充电策略消解规模化 EV 用户出行和充电等强不确定性行为带来的负面影响，提高交通能源系统的运行水平，是目前亟待解决的问题。

当前 EV 有序充电策略研究多以提升 EV 用户充电体验或配电网运行稳定为目标，优化主体较为单一。文献[10]考虑 EV 用户对充电价格和时间的响

**基金资助项目**：国家自然科学基金(52107080)；福建省财政厅财政资助专项(83022005)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52107080), Special Financial Aid of Fujian Provincial Department of Finance(83022005).

应，提出一种预约机会成本机制，合理安排同时请求充电 EV 用户的排队顺序实现有序充电；文献[11]为缓解 EV 用户行驶里程焦虑，提出一种优化 EV 用户充电成本的动态规划充电策略；文献[12-13]建立路-电耦合模型通过电价引导改变EV用户充电决策，缓解交通路网拥挤状况并提升配电网运行稳定性；文献[14]考虑电价与负荷的相关性建立改善配电网电能质量的分时电价模 型，提出以 EV 用户充电满意度为目标的优化充电策略，改善 EV 用户充电体验的同时稳定配电网安全运行；文献[15]基于实际路网模型，建立融合时间和能耗成本的交通综合阻抗模型，采用启发式搜索算法搜索 EV 用户的综合成本最优充电路径，但未考虑 EV 充电选择对配电网和充电站的影响。

随着交通能源互联网理论和大数据技术的发展，专家学者逐渐认为 EV 有序充电策略应兼顾交通路网、充电站和配电网运行状态，考虑多方主体利益诉求，提升整体运行水平。文献[16]基于“车-网-路”模式提出大规模 EV 接入下最优充电路径规划方法，但未考虑 EV 慢充负荷叠加带来的影响；文献[17]考虑车网互动(vehicle to grid，V2G)技术对 EV 用户和配电网的作用，提出基于动态分时电价的粒子群优化两阶段充放电优化方法，通过优化EV用户充电控制系数来降低充电费用并实现负荷的削峰填谷，但未考虑与交通路网和充电站的信息交互；文献[18]基于 EV 用户充放电成本和心理效应，构建长时间尺度 EV 充电调度模型，提升 EV 用户长期效益，避免单日充放电短时间尺度优化出现局部效益最高的问题，但未考虑大规模 EV 接入后充电站拥挤降低用户充电体验的问题；文献[19]基于“车-网-路-站”模型数据互联提出多主体目标优化 EV 有序充电策略，但未考虑不同类型 EV 行驶和充电选择的不确定性；文献[20]提出了一种计及需求响应充放电管理策略的物流配送 EV 临时驻车路径规划方法，综合用户、物资站和充电站三方利益，但未考虑 EV 用户充放电对配电网电能质量的影响；文献[21]基于“车-网-站”信息交互建立动态交通路网模型，提出自适应搜索算法搜索电动汽车、配电网和交通网综合路阻最小路径，既提升 EV 用户充电满意度，又减小路网和充电站的拥挤程度及配电网电压偏移率，但未考虑 EV 用户主观意愿，且交通节点阻抗模型尚不完善，存在道路饱和度为 1 时节点阻抗变为无穷大的问题。

本文针对 EV 用户充电体验降低、交通路网拥堵、充电站设备利用不均和配电网电能质量下降等问题，提出一种基于“车-路-站-网”信息耦合的 EV 有序充电策略。该策略考虑交通路网、充电站和配电网运行实况，根据 EV 需求和车辆状态，预测 EV 用户前往各充电站的充电决策因素，综合主客观因素建立基于组合赋权的 Topsis 决策模型，为 EV 用户制定个性化的充电路径和充电站选择，优化 EV 用户充电体验，同时缓解交通路网和充电站拥堵，提升配电网电能质量。此外，加入 EV 慢充优化实现对配电网负荷峰谷差的调节，提高配电网对 EV 负荷的承载能力。仿真结果证明该策略能够合理引导 EV 选择对四方主体均有益的充电路径和充电站，提升“车-路-站-网”的整体运行水平和稳定性。

## 1 “车-路-站-网”信息耦合模型

### 1.1 “车-路-站-网”信息耦合模型

随着 5G 通信和智能电网技术的快速发展[22]，交通能源互联网中源荷信息交互已经成为未来发展的趋势，假设电动汽车、交通路网、充电站和配电网多方信息能够上传信息交互平台实现数据交互，平台在数据加密前提下对电动汽车用户行驶和充电进行引导，构建“车-路-站-网”信息耦合系统。“车-路-站-网”耦合结构如图 1 所示，电动汽车主观能动性强，具有能量和时空双重属性，在交通路网中遵循自身出行规律，出行过程中随机改变交通路网拥堵程度、充电站和配电网的负荷需求状态；交通路网道路固定，是承载电动汽车行驶、连接充电站和配电网运行的基础设施；配电网是与电动汽车、交通路网设施和充电站实现能量交互的源头。

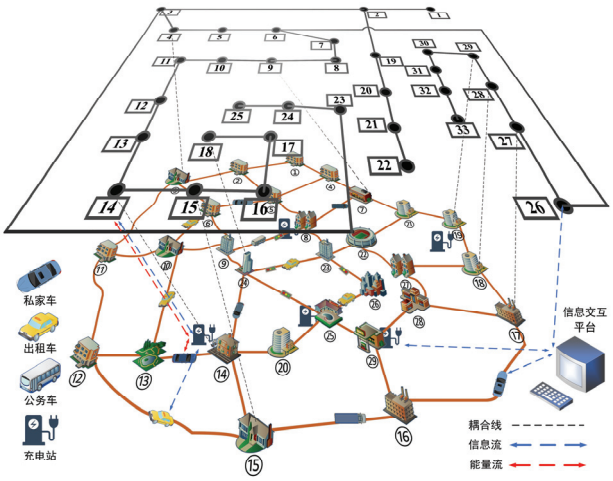



图 1 “车-路-站-网”耦合结构

Fig.1 Coupling structure of vehicle-road-station-grid

电动汽车作为连接交通路网、充电站和配电网的中心枢纽，其空间移动属性影响交通路网道路流量饱和度和充电站的拥挤状况，其充电负荷能量属性影响充电站设备利用和配电网线路负载变化，联合三方构成了车行路网、充电站网、能流配网的“车-路-站-网”时空能量信息耦合模型：

$$I_{CS}(t)=\{E_V(t),T_{RN}(t),C_S(t),D_N(t)\} \tag{1}$$

式中：$E_V(t)$、$T_{RN}(t)$、$C_S(t)$、$D_N(t)$分别为电动汽车、交通路网、充电站和配电网实时状态模型。

## 1.2　电动汽车模型

### 1.2.1　电动汽车初始参数

我国 EV 的种类和型号复杂多样，单一 EV 种类和型号无法体现 EV 用户出行和充电负荷需求的差异性，为表征各类 EV 用户出行的差异性，本文将 EV 用户分为私家车、出租车和公务车 3 类，EV 初始运行参数为：

$$E_V^0=\{T_{ev},C_{ap},P_{cp},F_{cp},S_{cp},T_{sdt},T_{edt},S_{dp},E_{dp},S_{oc}^0\} \tag{2}$$

式中：$T_{ev}$、$C_{ap}$、$P_{cp}$、$F_{cp}$、$S_{cp}$、$T_{sdt}$、$T_{edt}$、$S_{dp}$、$E_{dp}$、$S_{oc}^0$分别为初始化 EV 类型、电池容量、百公里功耗、快充功率、慢充功率、起始行驶时间、结束行驶时间、起始出行点、结束出行点、起始荷电状态，本文选取的 EV 型号参数如表 1 所示。

### 1.2.2　电动汽车状态模型

电动汽车状态模型集合了 EV 出行过程中自身的状态参数，状态模型为：

$$E_V(t)=\{E_V^0,O(t),D(t),S_{OC}(t),p(t),v(t)\} \tag{3}$$

式中：$O(t)$、$D(t)$、$S_{OC}(t)$、$p(t)$、$v(t)$分别为 $t$ 时刻 EV 的行驶起点、终点、荷电状态、行驶路径和行驶速度。其中 EV 行驶起讫点利用交通分析软件 TransCAD 的起止矩阵(orgin destination，OD)反推功能根据交通路网不同时段车流量数据逆推出行概率矩阵后通过蒙特卡洛抽样得到。

假设 EV 耗电量呈线性增加，则 EV 行驶过程中的荷电状态变化为：

$$S_{OC}(t)=\eta\frac{C_{ap}S_{OC}(t-1)-P_{cp}\Delta l/100}{C_{ap}} \tag{4}$$

式中：$\eta$为耗电损失系数；$\Delta l$ 为 $t-1$ 至 $t$ 时间内的行驶里程。

## 1.3　交通路网模型

交通路网是 EV 的出行载体，路网阻塞影响 EV 用户的行驶和充电选择，结合交通路网拓扑和道路流量得到交通路网状态模型为：

$$T_{RN}(t)=\{G,Q(t),v(t)\} \tag{5}$$

式中：$G$ 为交通路网拓扑模型；$Q(t)$为 $t$ 时刻道路中的车流量。

### 1.3.1　交通路网拓扑

交通路网拓扑如图 2 所示，采用图论方法描述交通路网拓扑模型 $G$，拓扑模型 $G=\{V,E\}$由点集 $V=\{1,2,3,\cdots,n\}$和边集 $E=\{(1,2),(2,3),\cdots,(x,y)\}$组成，点集 $V$ 表示道路中 EV 暂停休息或充电区域的集合，边集 $E$ 表示交通路网各区域间通行道路的集合，$(x,y)$表示由路网节点 $x$ 指向 $y$ 的通行道路。拓扑模型 $G$ 中点集和边集的连接关系由邻接矩阵 $\boldsymbol{D}_m$ 表示，$\boldsymbol{D}_m$ 具体表达形式见文献[21]。

### 1.3.2　交通路网实时流量模型

EV 在路网上行驶时，道路上的车流量时刻变化，交通路网道路车流量模型为：

$$Q_{ij}(t)=Q_{ij}(t-1)+\Delta Q \tag{6}$$

式中：$Q_{ij}(t-1)$、$Q_{ij}(t)$分别为 $t-1$ 和 $t$ 时刻道路$(i,j)$的车流量；$\Delta Q$ 为 $t-1$ 至 $t$ 时段内道路$(i,j)$变化的车流量。

### 1.3.3　交通路网电动汽车行驶速度模型

交通路网道路中的车流量、通行容量和交通堵塞等因素都会影响车辆的通行速度，考虑道路通行阻抗，建立 EV 行驶速度模型，EV 用户 $t$ 时刻在道路$(i,j)$上的行驶速度 $v_{ij}(t)$分别为：

表 1　EV 型号与参数

Table 1　EV models and parameters

| 电动汽车型号 | 电池容量/kWh | 百公里功耗/kWh | 快充功率/kW | 慢充功率/kW |
|---|---|---|---|---|
| 比亚迪 E6 | 82 | 20 | 43 | 6.6 |
| 比亚迪秦 Plus | 47.5 | 11.8 | 76 | 7 |
| 小鹏 P7 | 60.2 | 13.8 | 100 | 10 |
| 蔚来 ET5 | 75 | 17.3 | 100 | 6.6 |
| 特斯拉 Model3 | 60 | 12.5 | 60 | 6 |

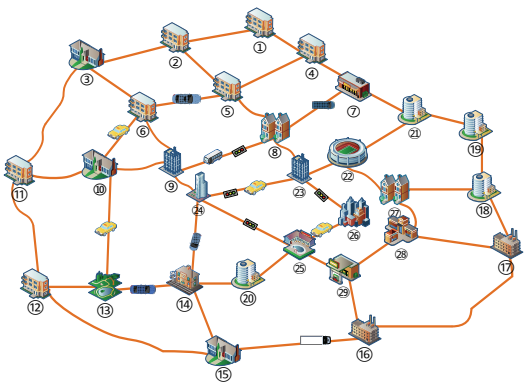


图 2　交通路网拓扑结构

Fig.2　Traffic network topology

$$\begin{cases} v_{ij}(t)=\dfrac{v_{ij}^{\mathrm{N}}}{1+\left(\dfrac{Q_{ij}(t)}{C_{ij}}\right)^{k}} \\ k=a+b\left(\dfrac{Q_{ij}(t)}{C_{ij}}\right)^{n} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$v_{ij}^{\mathrm{N}}$、$C_{ij}$分别为道路$(i,j)$的自由流速度和通行容量；$a$、$b$、$n$ 为不同类型道路的自适应系数。本文参考文献[23]实验数据将道路分为主干道和次干道，取主干道和次干道自由流速度分别为 60、40 km/h，且次干道受到公交车出行影响，主干道的自适应系数分别为 1.726、3.15、3；次干道的自适应系数分别为 2.153、3.984、3。

1.3.4 交通路网动态通行时间矩阵

针对传统 Floyd 最短距离路径搜索算法忽略实际通行时间的问题，本文考虑 EV 用户在路网行驶的实时状态，将邻接距离矩阵替换为 EV 动态通行时间矩阵，动态通行时间矩阵 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{m}}$ 和内部元素 $T_{\mathrm{m},ij}$ 分别为：

$$\boldsymbol{T}_{\mathbf{m}}=\left[T_{\mathrm{m},ij}\right]_{n\times n}=\begin{bmatrix} 0 & t_{12} & \cdots & \inf & t_{1n} \\ t_{21} & 0 & \cdots & \inf & \inf \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \inf & \inf & & 0 & t_{(n-1)n} \\ t_{n1} & \inf & \cdots & t_{n(n-1)} & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$T_{\mathrm{m},ij}=\begin{cases} t_{ij}=60l_{ij}/v_{ij}(t), & (i,j)\in E \\ 0, & i=j \\ \inf, & (i,j)\notin E\bigcap i\neq j \end{cases} \tag{9}$$

式中：$T_{\mathrm{m},ij}$为路网节点 $i$、$j$ 之间的时间关系；$t_{ij}$、$l_{ij}$分别为节点 $i$、$j$ 之间道路的通行时间和距离；$i=j$ 表示路网节点 $i$ 本身，通行时间为 0；inf 表示 2 节点间不存在直接通行道路，通行时间无穷大。

### 1.4 充电站模型

充电站模型 $C_{\mathrm{S}}(t)$集合交通路网中充电站参数和运行状态，表达式为：

$$C_{\mathrm{S}}(t)=\{S^{\mathrm{CS}},C^{\mathrm{CS}},P^{\mathrm{CS}}(t),S_{\mathrm{OC}}^{\mathrm{CS}}(t)\} \tag{10}$$

式中：$S^{\mathrm{CS}}$、$C^{\mathrm{CS}}$ 分别为交通路网中充电站的位置和容量；$P^{\mathrm{CS}}(t)$、$S_{\mathrm{OC}}^{\mathrm{CS}}(t)$ 分别为充电站 $t$ 时刻的充电需求和充电设备利用状态。

### 1.5 配电网模型

配电网模型 $D_{\mathrm{N}}(t)$集合配电网线路参数和运行状态，表达式为：

$$D_{\mathrm{N}}(t)=\{B_{\mathrm{us}},B_{\mathrm{ranch}},G_{\mathrm{en}},P^{\mathrm{DN}}(t),U(t)\} \tag{11}$$

式中：$B_{\mathrm{us}}$、$B_{\mathrm{ranch}}$、$G_{\mathrm{en}}$ 分别为配电网线路节点、支路和电源信息；$P^{\mathrm{DN}}(t)$、$U(t)$分别为 $t$ 时刻配电网负荷和电压。

配电网节点 $i$ 总负荷 $P_i^{\mathrm{DN}}(t)$ 由基础负荷与 EV 负荷 2 部分组成，表达式为：

$$P_i^{\mathrm{DN}}(t)=P_{\mathrm{base},i}^{\mathrm{DN}}(t)+P_{\mathrm{fcp},i}^{\mathrm{DN}}(t)+P_{\mathrm{scp},i}^{\mathrm{DN}}(t) \tag{12}$$

式中：$P_{\mathrm{base},i}^{\mathrm{DN}}(t)$、$P_{\mathrm{fcp},i}^{\mathrm{DN}}(t)$、$P_{\mathrm{scp},i}^{\mathrm{DN}}(t)$ 分别为 $t$ 时刻配电网节点 $i$ 的基础负荷、EV 快充和慢充负荷。

## 2 基于组合赋权 Topsis 决策的电动汽车有序充电策略

Topsis 决策方法是一种被广泛使用且灵活的多目标综合决策方法，能够反映多个目标相互作用下的综合影响情况，筛选出其中的折中最优解[24]。传统 Topsis 决策方法中的指标权重相同，无法反映出指标的重要程度及其相互间的关联性，本文选择层次分析法和改进的标准间冲突性相关性法(criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)结合的组合赋权 Topsis 决策方法，综合 EV 用户主观意愿和客观信息关联计算 EV 充电决策因素综合权重，为 EV 用户决策出均衡度最优的充电选择。基于本文方法的决策与基于其他优化算法的决策相比，计算时间短且搜索最优路径的可靠性更高，该方法考虑 EV 用户的真实出行需求，搜索 EV 用户行驶里程和时间最短路径，预测选择各充电路径快充对多方主体产生的充电决策因素，通过组合赋权 Topsis 方法决策最优充电路径，省去优化算法不断迭代搜寻最优路径的过程，避免迭代寻优陷入局部最优、耗时过长影响 EV 用户充电决策和降低用户充电体验的问题，基于本文方法进行决策相比其他方法的优势见附录 A 表 A1。

### 2.1 电动汽车充电决策因素

2.1.1 快充耗费时间

快充耗费时间 $T_{\mathrm{c}}$ 表示 EV 从产生快充需求至到达充电站开始快充耗费的时间，其计算式为：

$$T_{\mathrm{c}}=T_{\mathrm{xs}}+T_{\mathrm{wt}} \tag{13}$$

式中：$T_{\mathrm{xs}}$和 $T_{\mathrm{wt}}$ 分别为 EV 前往充电站所需的行驶时间和快充排队等待时间。

2.1.2 快充行驶里程

快充行驶里程 $L$ 表示 EV 从产生快充需求至到达充电站所需总里程，其计算式为：

$$L=\sum_{k=1}^{s}l_k \tag{14}$$

式中：$l_k$、$s$ 分别为 EV 前往充电站途中路段 $k$ 的道路长度和路段总数。

2.1.3　交通状态指数变化量

交通状态指数(traffic status index, TSI)是用于描述交通路网中拥挤程度的一个指标，能够量化交通路网实时状态，$T_{SI}$越高，表示道路交通拥堵程度越严重，EV 通行效率越低；$T_{SI}$越低，则表示道路交通畅通，EV 通行效率越高。交通状态指数变化量$\Delta T_{SI}$用于描述 EV 快充选择对交通路网整体状态的影响，该数值越小说明 EV 充电路径选择对路网的影响越小，缓解道路拥堵，$T_{SI}$和$\Delta T_{SI}$计算方法分别为：

$$T_{SI}=\frac{v_k-v_{N,k}}{v_k}\times 100 \tag{15}$$

$$\Delta T_{SI}=\sum_{t=T_S}^{T_{Sa}}\sum_{k=1}^{s}(T_{SI,k,t}-T_{SI,k,t}^{0}) \tag{16}$$

式中：$v_k$、$v_{N,k}$分别为 EV 在路段 $k$ 的实际通行速度和自由流速度；$T_S$、$T_{Sa}$分别为 EV 产生快充需求和到达充电站时刻；$T_{SI,k,t}^{0}$、$T_{SI,k,t}$分别为 $t$ 时刻路段 $k$ 有无 EV 快充需求用户行驶的交通状态指数。

2.1.4　充电站设备利用率

充电站平均设备利用率$A_{ch,i}^{CS}$指 EV 在充电站 $i$ 快充时的设备利用率均值，反映充电站设备的使用情况，计算方法为：

$$A_{ch,i}^{CS}=\frac{1}{T_{ch,i}}\sum_{t=T_{Sch,i}}^{T_{Ech,i}}(S_{OC,i}^{CS}(t)+\frac{S_{cp}}{C_i^{CS}}) \tag{17}$$

式中：$T_{ch,i}$、$T_{Sch,i}$、$T_{Ech,i}$分别为 EV 在充电站 $i$ 的快充时间段、起始和停止快充时刻；$S_{OC,i}^{CS}(t)$为 $t$ 时刻充电站 $i$ 的设备利用率；$C_i^{CS}$为充电站 $i$ 的容量。

充电站网均衡度 $\delta_{CS}$用于表征充电站网日内设备利用率的离散程度，能够反映各充电站的运行水平差异，计算方法为：

$$\delta_{CS}=\sqrt{\frac{1}{N_{CS}}\sum_{i=1}^{N_{CS}}(A_i^{CS}-A_{ave}^{CS})^2} \tag{18}$$

式中：$N_{CS}$为充电站数量；$A_i^{CS}$、$A_{ave}^{CS}$分别为一天中充电站 $i$ 的设备利用率均值和充电站网整体的设备利用率均值。

充电站拥挤程度指标 $Y_{CS}$指充电站网运行过程中平均每分钟排队等待快充的 EV 数量，用于描述充电站网的整体拥挤状况，计算方法为：

$$Y_{CS}=\sum_{i=1}^{N_{CS}}\sum_{t=1}^{T}Y_{CS,i}(t)/T \tag{19}$$

式中：$Y_{CS,i}(t)$为 $t$ 时刻充电站 $i$ 排队车辆数；$T$ 为仿真总步长。

2.1.5　电压偏移变化量

电压偏移变化量指标用于描述 EV 前往不同充电站快充对配电网电能质量的影响程度，计算方法为：

$$\Delta U_{ch,i,j}=\sum_{t=T_{Sch,i}}^{T_{Ech,i}}\left|\frac{U_{ch,i,j}(t)-U_{i,j}(t)}{U_{N,i,j}}\right| \tag{20}$$

式中：$\Delta U_{ch,i,j}$为 EV 在充电站 $i$ 快充时配电网耦合节点 $j$ 的电压偏移变化量；$U_{i,j}(t)$、$U_{ch,i,j}(t)$、$U_{N,i,j}$分别为 $t$ 时刻与充电站 $i$ 耦合的配电网节点 $j$ 加入 EV 快充负荷前后的实际电压和额定电压。

**2.2　基于组合赋权 Topsis 决策充电策略**

2.2.1　基于层次分析法主观权重计算

EV 用户充电选择具有主观性，通过层次分析法表征不同 EV 用户对充电决策因素的偏好程度。基于层次分析法主观权重计算步骤为：

1）构建 EV 用户判断矩阵

$$\boldsymbol{X}^{e}=\left[x_{ij}\right]_{n\times n}=\begin{bmatrix}x_{11}&x_{12}&\cdots&x_{1n}\\x_{21}&x_{22}&\cdots&x_{2n}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\x_{n1}&x_{n2}&\cdots&x_{nn}\end{bmatrix} \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{X}^{e}$为 EV 用户判断矩阵；$e$ 为 EV 类型；$n$ 为 EV 用户决策因素数量；$x_{ij}$为决策因素 $i$ 对决策因素 $j$ 的相对重要程度；$x_{ij}$和 $x_{ji}$互为倒数，根据 1—9 互反性标度确定。

2）层次排序及一致性检验

层次排序即求取 EV 用户判断矩阵$\boldsymbol{X}^{e}$的最大特征根 $\lambda_{max}$ 及其对应的特征向量，将特征向量归一化处理后得到主观权重 $\boldsymbol{W}_{AHP}=[\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n]^{T}$；随后计算判断矩阵的一致性比例(consistency ratio，CR)，当 CR<0.1 时，说明判断矩阵的一致性合理，否则需要更新 EV 用户判断矩阵，一致性检测具体判断方法见文献[25]。

2.2.2　基于改进 CRITIC 方法的客观权重计算

CRITIC 方法是一种考虑多个决策目标相关性和信息量差异性的客观赋权法，本文引入基尼系数衡量指标内的差异性，并将正负相关性统一，对冲突系数中的相关系数取绝对值。基于改进 CRITIC 方法的客观权重计算步骤为：

1）构建 EV 决策矩阵

$$\boldsymbol{A}=\left[a_{ij}\right]_{m\times n}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&\cdots&a_{1n}\\a_{21}&a_{22}&\cdots&a_{2n}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\a_{m1}&a_{m2}&\cdots&a_{mn}\end{bmatrix} \tag{22}$$

式中：$\boldsymbol{A}$为 EV 充电选择的决策矩阵，共有 $m$ 种充电选择和 $n$ 个充电决策因素；$a_{ij}$为第 $i$ 种充电选择预测得到的决策因素 $j$。

2）正向归一化和标准化

EV 用户决策因素均为成本型指标，通过式(23)得到正向归一化决策矩阵 $\boldsymbol{Y}=[y_{ij}]_{m\times n}$，通过式(24)计算得到标准化决策矩阵 $\boldsymbol{Z}=[z_{ij}]_{m\times n}$。

$$y_{ij}=\frac{\max\limits_{j}(a_{ij})-a_{ij}}{\max\limits_{j}(a_{ij})-\min\limits_{j}(a_{ij})} \tag{23}$$

$$z_{ij}=y_{ij}/\sqrt{\sum_{i=1}^{m}y_{ij}^2},j=1,2,\cdots,n \tag{24}$$

3）计算冲突系数

相关系数用于衡量决策因素间的冲突性，相关性越强则冲突越小，反之冲突越大，根据 Pearson 系数计算标准化决策矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 的相关性得到冲突系数，决策因素信息量计算式为：

$$r_{ij}=\frac{\operatorname{cov}(\boldsymbol{Z}_i,\boldsymbol{Z}_j)}{\sigma(\boldsymbol{Z}_i)\sigma(\boldsymbol{Z}_j)} \tag{25}$$

$$c_j=\sum_{i=1}^{n}(1-|r_{ij}|) \tag{26}$$

式中：$r_{ij}$为决策因素 $i$、$j$ 之间的相关系数；$\operatorname{cov}(\boldsymbol{Z}_i,\boldsymbol{Z}_j)$为决策因素 $i$ 与 $j$ 之间的协方差；$\sigma(\boldsymbol{Z}_i)$、$\sigma(\boldsymbol{Z}_j)$分别为决策因素 $i$、$j$ 的标准差；$c_j$为指标 $j$ 所含信息量。

4）计算基尼系数

基尼系数是衡量社会成员财富分配的重要指标，引入尼基系数衡量 EV 用户决策因素内的差异性，计算方法为：

$$\xi_j=\frac{\sum\limits_{i=1}^{m}\sum\limits_{k=1}^{m}|z_{ij}-z_{kj}|}{2m\sum\limits_{i=1}^{m}z_{ij}} \tag{27}$$

式中：$\xi_j$为第 $j$ 个决策因素的基尼系数。

5）确定客观权重

$$\beta_j=\frac{\xi_j c_j}{\sum\limits_{j=1}^{n}\xi_j c_j} \tag{28}$$

将决策因素的冲突性和差异性统一得到表征整体信息量大小的客观权重 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{C}}=[\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_n]^{\mathrm{T}}$，$\beta_j$越大说明决策因素 $j$ 所占信息比重越大。

2.2.3 综合权重确定

通过层次分析法和改进 CRITIC 法计算得到主客观权重 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{AHP}}$ 和 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{C}}$，依据最小信息鉴别信息原理求取综合权重，目标函数为：

$$\begin{cases}\min J(\boldsymbol{W})=\sum\limits_{j=1}^{n}w_j(\ln\dfrac{w_j}{\alpha_j}+\ln\dfrac{w_j}{\beta_j})\\ \text{s.t.}\ \sum\limits_{j=1}^{n}w_j=1,w_j\geq 0\end{cases} \tag{29}$$

采用拉格朗日乘数法求解目标函数得到综合权重为：

$$w_j=\frac{\sqrt{\alpha_j\beta_j}}{\sum\limits_{j=1}^{n}\sqrt{\alpha_j\beta_j}} \tag{30}$$

综合权重向量 $\boldsymbol{W}=[w_1,w_2,\cdots,w_n]^{\mathrm{T}}$。

2.2.4 基于组合赋权 Topsis 决策方法

基于组合赋权 Topsis 决策方法的决策步骤为：

1）将 EV 充电选择决策矩阵 $\boldsymbol{A}$ 正向归一化和标准化，得到标准化决策矩阵 $\boldsymbol{Z}$。

2）通过式(31)确定标准化决策矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 的正负理想解 $Z^{\pm}$，其中 $Z^{+}$是 $\boldsymbol{Z}$ 中各决策指标的最大值，$Z^{-}$是 $\boldsymbol{Z}$ 中各决策指标的最小值。

$$\begin{cases}Z^{+}=\max\limits_{1\leq i\leq m}(z_{ij})\\ Z^{-}=\min\limits_{1\leq i\leq m}(z_{ij})\end{cases} \tag{31}$$

3）计算各决策选择与正负理想解的距离作为各评价对象的评判标准，其距离 $d_i^{\pm}$ 的计算式为：

$$d_i^{\pm}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}w_j(z_{ij}-z_j^{\pm})^2} \tag{32}$$

式中：$z_j^{\pm}$为正负理想解 $Z^{\pm}$中的第 $j$ 个元素。

4）计算贴近度

$$S_i=\frac{d_i^{-}}{d_i^{+}+d_i^{-}} \tag{33}$$

式中：$S_i$为充电选择 $i$ 与正理想解的贴近度，$S_i$越接近 1 说明该解与正理想解越接近，该评价对象为最优折中解，得出最适合的充电决策选择。

### 2.3 电动汽车慢充优化策略

假设 EV 用户返程后的慢充负荷接入信息交互平台，充电时间为休息开始时刻至次日的出行时刻，次日出行时刻与第 1 天相同，EV 充电设备自动预约电动汽车的慢充时间段，改善 EV 慢充负荷集中增加问题。在满足 EV 用户充电需求的前提下，以 EV 用户休息时间为限，选择休息时间段内配网节点负荷最小的时间段进行慢充，慢充优化过程如图 3 所示，慢充优化模型为：

$$T_{\mathrm{slow}}^{\mathrm{Sch}}=\begin{cases}T_{\mathrm{load}}^{\min}-0.5T_{\mathrm{slow}}^{\mathrm{ch}}, & T_{\mathrm{edt}}\leq T_{\mathrm{load}}^{\min}-0.5T_{\mathrm{slow}}^{\mathrm{ch}}\ \&\\ & T_{\mathrm{load}}^{\min}+0.5T_{\mathrm{slow}}^{\mathrm{ch}}\leq T_{\mathrm{sdt}}\\ T_{\mathrm{sdt}}-T_{\mathrm{slow}}^{\mathrm{ch}}, & T_{\mathrm{sdt}}<T_{\mathrm{load}}^{\min}+0.5T_{\mathrm{slow}}^{\mathrm{ch}}\\ T_{\mathrm{edt}}, & T_{\mathrm{load}}^{\min}-0.5T_{\mathrm{slow}}^{\mathrm{ch}}<T_{\mathrm{edt}}\end{cases} \tag{34}$$

式中：$T_{\mathrm{solw}}^{\mathrm{Sch}}$为 EV 用户服从慢充优化时的起始慢充时间；$T_{\mathrm{solw}}^{\mathrm{ch}}$为 EV 用户慢充时间段；$T_{\mathrm{load}}^{\min}$为 EV 接入配网节点负荷最小时刻；图 3 中 $T_{\mathrm{solw}}^{\mathrm{Ech}}$为 EV 用户服

从慢充优化时的结束慢充时间。

### 2.4　电动汽车有序充电流程

基于组合赋权 Topsis 决策的电动汽车有序充电流程如附录 A 图 A1 所示，首先构建“车-路-站-网”信息耦合模型，初始化交通路网、充电站和配电网状态，随机抽取 EV 种类及型号参数并初始化 EV 用户出行起止时间、出行起点、荷电状态，随后基于 OD 出行概率矩阵随机抽取 EV 行驶终点，信息交互平台以动态 Floyd 最短时间路径搜索算法搜索最短耗时路径导航 EV 前往终点，途中通过 EV 行驶速度模型计算 EV 通行路段中行驶速度，并更新路段车流量。当 EV 行驶途中电池荷电状态低于充电阈值时产生快充需求并传输到信息交互平台，集合“车-路-站-网”运行实况预测 EV 用户通过不同充电路径选择产生的充电决策因素，基于组合赋权 Topsis 有序充电策略对充电选择进行排序，为 EV 用户导航最优充电路径和充电站；否则 EV 正常行驶至目的地休息。EV 用户休息结束后，判断是否达到结束行驶时间，若未达到，重新抽取终点继续行驶；否则 EV 返回出行起点休息并进行慢充优化。

## 3　算例分析

### 3.1　仿真条件设定

本文将 IEEE33 节点配电网与 29 节点交通路网系统耦合[26]，配电网总负荷大小为 3715 kW+2300 kVar，基准电压为 12.66 kV，基准功率为 10 MW，二者的耦合关系如附录 A 表 A2 所示；设置参与仿真电动私家车、出租车和公务车的数量分别为 800、200、200 辆，EV 充电阈值为 0.2，不同种类的 EV 出行概率和休息时间如附录 A 表 A3 所示[27]。交通路网中 EV 充电站的位置和容量分别为{6, 13, 23, 25, 28}、{600, 400, 500, 600, 800} kW，仿真时间步长为 1 min。

### 3.2　仿真结果分析

本文算例提出 3 种 EV 充电策略并进行分析：策略 1，计及慢充优化的组合赋权 Topsis 决策的有序充电策略；策略 2，基于组合赋权 Topsis 决策的有序充电策略，简称为有序充电策略；策略 3，无序充电策略，EV 用户产生快充需求时选择距离最近的充电站充电。

#### 3.2.1　不同策略运行结果分析

EV 用户选择不同充电策略时“车-路-站-网”多方运行结果如表 2 所示。由表 2 可知，EV 用户选择策略 1 和策略 2 前往充电站快充的平均行驶里程和行驶时间与策略 3 相比均增加了约 0.8 km、1.4 min；快充平均排队等待时间分别为策略 3 的 24%和 27%，约缩减 3/4 的排队时间；充电站网平均每分钟排队等待充电的 EV 数量分别减少 9.7 辆和 9 辆；交通状态指数变化量分别降低 104 和 67，缓解交通路网的整体运行拥挤程度；充电站网设备均衡度分别减少 0.0221 和 0.03，约为策略 3 的 68.2%和 56.8%，提升了整个充电站网设备利用率；配电网整体电压偏移分别减少 1.61(p.u.)和 1.27(p.u.)。根据分析可知，EV 用户选择策略 1 和策略 2 进行有序充电时，快充平均行驶时间和行驶里程有所增大，而快充平均排队等待时间大幅降低，提高 EV 用户充电体验，降低交通状态指数变化量、充电站拥挤程度和配电网电压偏移，EV 用户选择有序充电策略使得充电站网提供更加均衡的服务、充电站设备得到更加均匀的利用，缓解配电网负荷过于集中导致整体电压降落过大的问题。与策略 2 相比，选择策略 1 的 EV 用户的快充平均排队时间、交通状态指数变化量、充电站拥挤程度和配电网电压偏移均有所下降。因此可以看出，通过有序充电策略引导 EV 用户快充时，“车-路-站-网”多方主体利益均有所改善；且计及慢充优化的有序充电策略能够进一

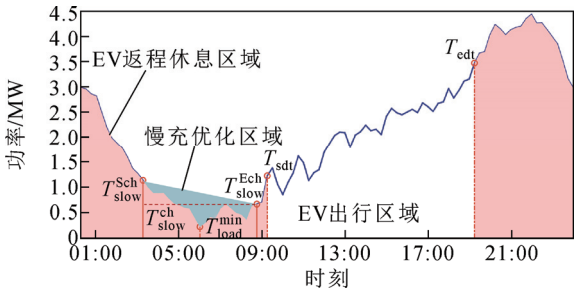



图 3　慢充优化示意图

Fig.3　Slow charging optimization diagram

表 2　不同策略下电动汽车充电仿真结果

Table 2　Simulation results of EV charging with different strategies

| 参数名称 | 不同快充策略下的结果 | | |
|---|---|---|---|
| | 策略 1 | 策略 2 | 策略 3 |
| 平均行驶时间/min | 5.66 | 5.7 | 4.26 |
| 平均排队时间/min | 8.75 | 9.83 | 36 |
| 平均行驶里程/km | 3.64 | 3.64 | 2.79 |
| 交通状态指数变化量 | 2 766 | 2 803 | 2 870 |
| 充电网设备均衡度 | 0.0474 | 0.0395 | 0.0695 |
| 充电网拥挤程度/(辆·min$^{-1}$) | 4.4 | 5.1 | 14.1 |
| 配电网电压偏移(p.u.) | 26.28 | 26.62 | 27.89 |

步提升“车-路-站-网”的整体运行水平。

3.2.2 电动汽车用户体验分析

交通路网中产生快充需求的 EV 用户选择不同充电策略前往充电站快充时的排队等待时间如表 3 所示。由表 3 可知，3 种策略下快充排队时间在 10 min 内的 EV 数量在总需求车辆中的占比分别为 91.2%、89.2%和 75.2%。与策略 3 相比，策略 1、2 快充排队等待时间在 0~10 min 的 EV 分别增加 74 辆和 89 辆，等待时间在 10~30 min 的 EV 分别减少 14 辆和 9 辆，等待时间在 30~60 min 的 EV 分别减少 20 辆和 13 辆；等待时间>1 h 的 EV 分别减少 81 辆和 76 辆。说明有序充电策略能够增加充电站网短时间排队快充的 EV 数量，大幅减少长时间排队快充 EV 数量，提高 EV 充电效率，缓解大规模 EV 充电等待时间无序延长导致 EV 用户充电体验下降的问题。

3.2.3 充电站运行结果分析

EV 用户选择不同充电策略时，充电站网电动汽车数量变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知，不同策略下充电站网充电车辆的变化情况基本一致，充电高峰期均在 16:00—20:00，3 种策略下充电站网总车辆最多分别为 68、72、104 辆，在充电高峰期，与策略 3 相比，策略 1 和策略 2 下充电站网中车辆总数减少约 1/3，且减少车辆均为排队等待快充车辆，说明有序充电策略能够引导 EV 用户充分利用各充电站快充设备，大幅减少充电站网中排队等待充电的 EV 数量；与策略 2 相比，策略 1 下充电站网排队车辆在充电高峰期的数量曲线波动更小，且排队车辆峰值更小，说明计及慢充优化的有序充电策略能够进一步减少充电排队等待车辆，缓解充电站网 EV 排队拥挤问题。

EV 用户选择不同充电策略时，充电站 $C_{S1}$—$C_{S5}$ 的平均设备利用率如图 5 所示，策略 1 中设备利用率最高为 $C_{S1}$ 的 47.2%，最低为 $C_{S2}$ 的 32.3%；策略 2 设备利用率最高为 $C_{S1}$ 的 46.3%，最低为 $C_{S3}$ 的 36.3%；策略 3 设备利用率最高为 $C_{S3}$ 的 54.5%，最低为 $C_{S4}$ 的 34.7%；3 种策略下充电站的平均设备利用率极差分别为 14.9%、10%、19.8%。由图 4 和图 5 可知，无序充电情况下 EV 用户容易聚集在一个充电站快充，增加充电高峰期时排队等待充电 EV 数量，进而导致部分充电站持续高强度工作而其他充电站设备空闲问题出现，而在有序引导策略下，EV 用户受到自身需求及“车-路-站-网”状态影响选择充电站充电，充分利用充电站网中各充电站充电设备，提高空闲充电站设备利用率，缓解拥堵充电站设备持续工作压力，提升充电站网的整体运行水平。

表 3 不同策略下电动汽车用户排队时间

Table 3 Queuing time of EV users with different strategies

| 充电排队等待时间/min | 不同策略下的电动汽车数量/辆 | | |
|---|---|---|---|
| | 策略 1 | 策略 2 | 策略 3 |
| $0\le T_{wt}<10$ | 599 | 614 | 525 |
| $10\le T_{wt}<30$ | 17 | 22 | 31 |
| $30\le T_{wt}<60$ | 9 | 16 | 29 |
| $60\le T_{wt}$ | 33 | 38 | 114 |
| 合计 | 658 | 690 | 699 |

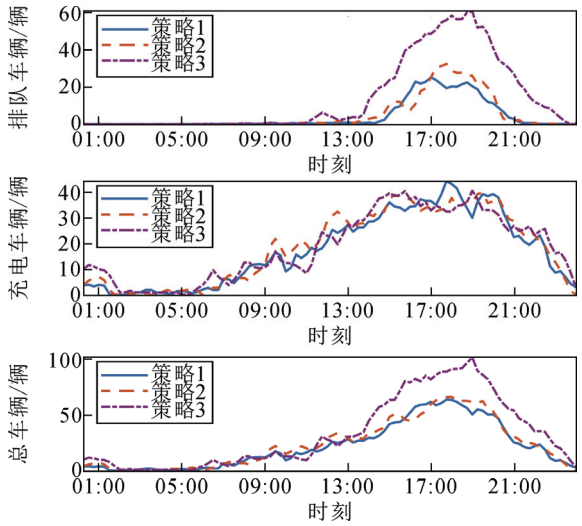



图 4 不同策略下充电站网车辆

Fig.4 Quantity of vehicles at charging station network with different strategies

3.2.4 配电网运行结果分析

不同充电策略下 EV 负荷接入配电网仿真运行结果如表 4 所示，从表 4 可知，与策略 3 相比，策略 1、策略 2 网损率分别降低 0.53%和 0.3%，配电网电压越限时间分别减少 33.1%和 13.5%，负荷波动分别减小 6.85%和−5.32%。与策略 3 相比，EV 用户选择策略 1 和策略 2 配电网的网损率和越限时间均有减少，且策略 1 对配电网电能质量的提升更大，这是因为 EV 返程休息时的慢充负荷规模巨大，当大量 EV 结束出行返回休息地点即刻进行慢充时，慢充时段恰好与快充需求和基础负荷需求高峰叠加，导致配电网负荷峰谷差增大，负荷波动增大，有序充电策略虽然满足 EV 用户的充电需求并减小了配电网压降，但是快充与慢充负荷叠加仍加剧了负荷波动；加入慢充优化后，EV 用户不再选择即

时慢充的方式，而是在满足自身第 2 天出行荷电状态需求的前提下，移动慢充时间段，填补负荷低谷，使 EV 用户休息时间内接入点的配电网负荷波动最小，减小配电网负荷波动电压越限风险。

不同策略下 EV 负荷和配电网网损变化曲线如图 6 和图 7 所示，由图 6、7 可知，策略 2 与策略 3 的 EV 负荷和配电网网损变化趋势基本一致，波动变化差别较小，而策略 1 的 EV 负荷变化更加平稳，峰谷差更小，配电网网损整体降低。结合表 4 可知，有序充电策略虽然减小 EV 用户快充排队时间，满足用户实时快充需求，提升配电网电压质量，但未改善配电网整体的负荷波动情况，使电网负荷波动增大；而加入慢充优化策略控制 EV 用户慢充负荷接入时间，能够减小 EV 负荷波动和配电网网损，进一步降低电压越限风险。

不同策略下配电网节点电压标幺值变化情况如图 8 所示，由图 8 可知，规模化 EV 接入配电网后，电压降落最大的情况均出现在 17:00—20:00 之间，此时大部分私家车和公务车用户已返回休息地点进行慢充，各地区 EV 慢充、快充和基础负荷的无序叠加导致“峰上加峰”问题，配电网整体电压大幅下降，电压越限问题严重。3 种策略下配电网电压最低点均出现在节点 18 处，最低值分别为 0.8861、0.8768 和 0.8708，最低电压出现的时刻分别为 19:40、20:17 和 21:02；配电网各节点电压出现低于 0.9(p.u.)的时间分别为 382、689、1296 min。说明有序充电策略能够改变快充负荷的接入点和接入时间，减小配电网电压降落的最大偏移值，大幅降低配电网电压越限的持续时间；计及慢充优化的有序充电策略能够同时改变 EV 慢充负荷的接入时间，实现 EV 负荷的削峰填谷，缓解配电网负荷“峰上加峰”问题，抬升配电网整体电压，减少电压越限时间，提升了配电网运行稳定性。故采用计及慢充优化的有序充电策略时，电力系统的安全运行效果更佳，增大了配电网对 EV 负荷的容纳能力。

## 4　结论

本文从电动汽车、交通路网、充电站和配电网 4 方主体的利益出发，构建“车-路-站-网”信息耦合模型，考虑 EV 用户行驶的实时状态及主观意愿，提出基于组合赋权 Topsis 决策的电动汽车有序充电策略，通过结合实际路网仿真验证其有效性和合理性，得到以下结论：

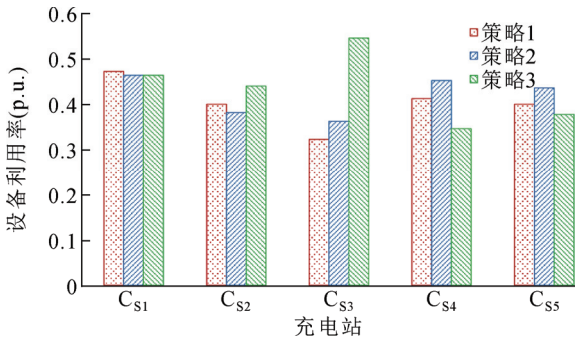



图 5　不同策略下充电站平均设备利用率

Fig.5　Average equipment utilization of charging stations with different strategies

表 4　配电网仿真结果

Table 4　simulation results of distribution network

| 策略 | 网损率/% | 越限时间/min | 负荷波动/kW |
|---|---|---|---|
| 策略 1 | 3.89 | 4147 | 1522 |
| 策略 2 | 4.12 | 5366 | 1721 |
| 策略 3 | 4.42 | 6202 | 1634 |

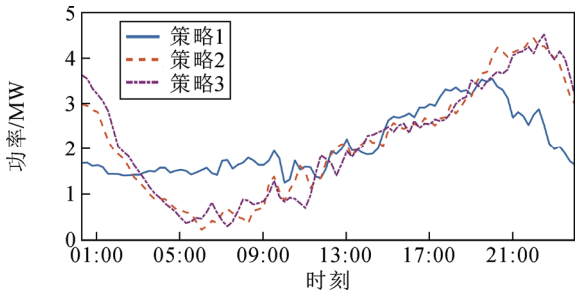



图 6　不同策略下 EV 负荷

Fig.6　EV load with different strategies

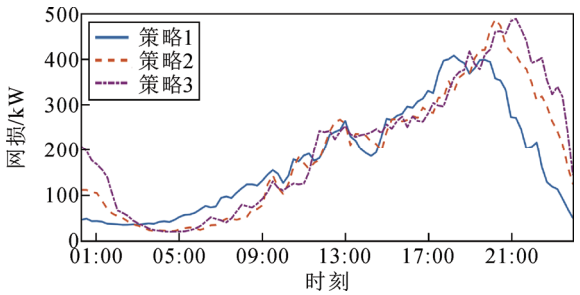



图 7　不同策略下网损变化

Fig.7　Distribution network loss changes with different strategies

1）基于交通能源互联网理论构建“车-路-站-网”信息耦合模型，联合各方实时数据预测 4 方相互影响下的电动汽车选择不同路径的充电结果，为综合 4 方利益充电选择策略的实现提供现实依据。

2）将提升电动汽车用户充电体验、改善交通

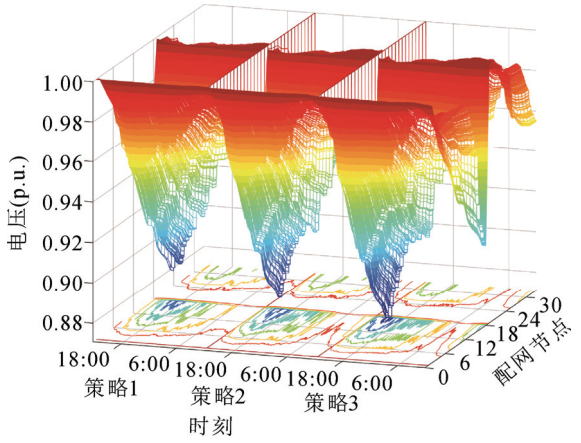



图 8 不同策略下配电网节点电压

Fig.8 Nodal voltage magnitudes with different strategies

和充电站拥挤程度、提高充电站设备利用率和配电网电压稳定性作为引导电动汽车的充电目标，为电动汽车用户推荐利于 4 方主体的充电路径，解决了无序充电导致其他主体运行体验降低的问题，提高“车-路-站-网”的整体运行水平。

3）电动汽车规模增大后其慢充负荷对配电网的影响也逐渐增大，而考虑电动汽车快充与慢充负荷联合优化的充电策略能够进一步降低配电网的负荷波动，提升配电网的稳定性，增加配电网对电动汽车的承载能力。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

## 参考文献 References

[1] 胡海涛，郑 政，何正友，等. 交通能源互联网体系架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报，2018，38(1)：12-24.
HU Haitao, ZHENG Zheng, HE Zhengyou, et al. The framework and key technologies of traffic energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 12-24.

[2] 廖 凯，张润涛，杨子安，等. 交通能源融合大数据平台架构与应用[J]. 电力系统自动化，2022，46(12)：20-35.
LIAO Kai, ZHANG Runtao, YANG Zian, et al. Architecture and application of traffic-energy integrated big data platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 20-35.

[3] 李高俊杰，杨 军，朱 旭，等. 计及电动汽车用户响应特性的充电站实时电能共享机制[J]. 电力系统自动化，2022，46(12)：56-66.
LIGAO Junjie, YANG Jun, ZHU Xu, et al. Real-time energy sharing mechanism for charging stations considering user response characteristics of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 56-66.

[4] 卢 慧，谢开贵，邵常政，等. 考虑燃油车和电动汽车动态混合交通流的电动汽车充电站规划[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1150-1160.
LU Hui, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Charging station planning with the dynamic and mixed traffic flow of gasoline and electric vehicles[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1150-1160.

[5] 张卫国，徐青山，陈 堃，等. 考虑电价敏感用户行为的电动汽车虚拟电厂外特性[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1372-1379.
ZHANG Weiguo, XU Qingshan, CHEN Kun, et al. External characteristics of electric vehicle virtual power plant considering electricity price-sensitive user behavior[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1372-1379.

[6] 杨有为，徐春梅，彭道刚，等. 动态能源与地理信息融合的光储充电站电动汽车充电路径引导[J/OL]. 电力自动化设备，2023：1-13[2023-04-03]. https://doi.org/10.16081/j.epae. 202303040.
YANG Youwei, XU Chunmei, PENG Daogang, et al. Charging path guidance of electric vehicles at photovoltaic-storage charging stations based on dynamic energy and geographic information fusion[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2023: 1-13[2023-04-03]. https://doi. org/10.16081/j.epae.202303040.

[7] 崔 岩，胡泽春，段小宇. 考虑充电需求空间灵活性的电动汽车运行优化研究综述[J]. 电网技术，2022，46(3)：981-994.
CUI Yan, HU Zechun, DUAN Xiaoyu. Review on the electric vehicles operation optimization considering the spatial flexibility of electric vehicles charging demands[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 981-994.

[8] 姚一鸣，赵溶生，李春燕，等. 面向电力系统灵活性的电动汽车控制策略[J]. 电工技术学报，2022，37(11)：2813-2824.
YAO Yiming, ZHAO Rongsheng, LI Chunyan, et al. Control strategy of electric vehicles oriented to power system flexibility[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2813-2824.

[9] 宋晓通，吕倩楠，孙 艺，等. 基于电价引导的电动汽车与综合能源系统交互策略[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3744-3754.
SONG Xiaotong, LÜ Qiannan, SUN Yi, et al. Interactive strategy of electric vehicles and integrated energy system based on electricity price guidance[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3744-3754.

[10] LI X C, XIANG Y, LYU L, et al. Price incentive-based charging navigation strategy for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5762-5774.

[11] 孙 磊，冯智伟，韩美灵，等. 面向成本优化的电动汽车弹性充电策略[J/OL]. 小型微型计算机系统，2022：1-8[2023-06-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1106.TP. 20221114.1754.010.html.
SUN Lei, FENG Zhiwei, HAN Meiling, et al. Cost-optimized elastic charging strategy for electric vehicles[J/OL]. Journal of Chinese Computer Systems, 2022: 1-8[2023-06-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1106.TP.20221114.1754.010.html.

[12] 彭春华，姜 治，孙惠娟，等. 路-电耦合配电网调度与充电策略协同鲁棒优化[J]. 电网技术，2023，47(7)：2762-2773.
PENG Chunhua, JIANG Zhi, SUN Huijuan, et al. Coordinated robust optimization of distribution network scheduling and charging strategy with traffic-grid coupling[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2762-2773.

[13] 周 毅，袁 泉，汤 奕，等. 基于路-电耦合网络的电动汽车充电决策优化方法[J]. 电网技术，2021，45(9)：3563-3570.
ZHOU Yi, YUAN Quan, TANG Yi, et al. Charging decision optimization for electric vehicles based on traffic-grid coupling networks[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3563-3570.

[14] 王岩庆，王 骁，丛若晨，等. 考虑配电网运行安全的出行电动汽车充电引导策略[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2131-2139.
WANG Yanqing, WANG Xiao, CONG Ruochen, et al. Charging guidance strategy of traveling electric vehicle considering the operation safety of distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2131-2139.

[15] 林歆悠，周斌豪，夏玉田. 融合动态能耗与路网信息的电动汽车充

电路径规划策略[J]. 中国机械工程，2021，32(6)：705-713.
LIN Xinyou, ZHOU Binhao, XIA Yutian. Charging path planning strategy of electric vehicles with integrating dynamic energy consumption and network information[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(6): 705-713.

[16] 严弈遥，罗禹贡，朱　陶，等. 融合电网和交通网信息的电动车辆最优充电路径推荐策略[J]. 中国电机工程学报，2015，35(2)：310-318.
YAN Yiyao, LUO Yugong, ZHU Tao, et al. Optimal charging route recommendation method based on transportation and distribution information[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 310-318.

[17] 张　良，孙成龙，蔡国伟，等. 基于 PSO 算法的电动汽车有序充放电两阶段优化策略[J]. 中国电机工程学报，2022，42(5)：1837-1851.
ZHANG Liang, SUN Chenglong, CAI Guowei, et al. Two-stage optimization strategy for coordinated charging and discharging of EVs based on PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1837-1851.

[18] 侯　慧，王逸凡，吴细秀，等. 长时间尺度下计及里程焦虑心理效应的电动汽车充放电调度策略[J]. 高电压技术，2023，49(1)：85-93.
HOU Hui, WANG Yifan, WU Xixiu, et al. Electric vehicle charging and discharging scheduling strategy considering psychological effect of mileage anxiety on a long-time scale[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 85-93.

[19] 侯　慧，樊　浩，苏　舒，等. 多方互利共赢的电动汽车智能充电服务策略[J]. 电力系统自动化，2017，41(19)：66-73.
HOU Hui, FAN Hao, SU Shu, et al. Multilateral win-win strategy for smart charging service of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 66-73.

[20] 汪顺其，向　月，王晏亮. 考虑临时驻车充放电管理的电动汽车配送路径规划方法[J]. 电力自动化设备，2023，43(7)：94-101.
WANG Shunqi, XIANG Yue, WANG Yanliang. Electric vehicle distribution path planning method considering charging and discharging management during temporary parking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 94-101.

[21] 邢　强，陈　中，冷钊莹，等. 基于实时交通信息的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 中国电机工程学报，2020，40(2)：534-549.
XING Qiang, CHEN Zhong, LENG Zhaoying, et al. Route planning and charging navigation strategy for electric vehicles based on real-time traffic information[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 534-549.

[22] 盛戈皞，钱　勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1765-1778.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key Technologies and development trends of digital power equipment for new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1765-1778.

[23] 陈　盛. 城市道路交通流速度流量实用关系模型研究[D]. 南京：东南大学，2004.
CHEN Sheng. Research on practical velocity-volume model of urban streets[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2004.

[24] SONG F G, TONG S C. Comprehensive evaluation of the transformer oil-paper insulation state based on RF-combination weighting and an improved TOPSIS method[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(6): 654-665.

[25] 付志扬，王　涛，孔令号，等. 基于 AHP-TOPSIS 算法的重要电力客户用电状态评估[J]. 电网技术，2022，46(10)：4095-4101.
FU Zhiyang, WANG Tao, KONG Linghao, et al. Power consumption state evaluation of important power customers based on AHP-TOPSIS algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 4095-4101.

[26] 刘丽军，吴　桐，陈贤达，等. 基于时空特性以及需求响应的 DG 和 EV 充电站多目标优化配置[J]. 电力自动化设备，2021，41(11)：48-56.
LIU Lijun, WU Tong, CHEN Xianda, et al. Multi-objective optimal allocation of DG and EV charging station based on space-time characteristics and demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 48-56.

[27] TANG D F, WANG P. Probabilistic modeling of nodal charging demand based on spatial-temporal dynamics of moving electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 627-636.



**刘丽军**(通信作者)
1982—，女，博士，副教授，博导
研究方向为新能源电网投资与规划、新能源发电及微电网、需求侧管理等
E-mail: liulijun0120@fzu.edu.cn

LIU Lijun
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



**陈　昌**
1998—，男，硕士生
研究方向为电动汽车有序充电、含电动汽车配电网规划等
E-mail: 2415878529@qq.com

CHEN Chang



**胡　鑫**
1999—，男，硕士生
研究方向为电力系统运行和控制、可再生能源应用
E-mail: 873070811@qq.com

HU Xin

收稿日期　2023-08-10　修回日期　2023-11-15　　编辑　程子丰

## 附录 A

为验证本文方法相比于优化算法的优势，将本文组合赋权 Topsis 方法与遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)、蚁群算法(ACO)进行电动汽车有序充电仿真。以本文“车-路-站-网”耦合模型为基础，设置 1200 辆电动汽车用户在路网中运行，对用户遵从四种方法搜寻最优路径的充电仿真结果分别进行分析，得到仿真结果如表 A1 所示。

由表 A1 可得，本文基于组合赋权 Topsis 的决策方法与基于 GA、PSO 和 ACO 的决策方法仿真总耗时分别为 124.4、43 408.9、25 816.6、2629.2 s，假设仿真时间均用在电动汽车用户出行决策中，则每位产生充电需求电动汽车用户平均等待最优决策时间为 0.19、68.69、38.94、3.45 s，本文方法在最优路径搜索耗时分别为基于 GA、PSO 和 ACO 方法的 0.2686%、0.4837%和 5.3542%，由此可知本文基于组合赋权 Topsis 的决策方法能够实时提供电动汽车用户最优充电路径，基于 GA、PSO 和 ACO 的决策方法计算耗时过长，影响电动汽车用户的决策体验；在电动汽车用户的平均行驶里程、时间和排队时间上，基于 GA 和 PSO 算法的决策方法搜寻最优充电路径的结果均比本文方法差，基于 ACO 算法的决策方法在平均行驶里程和行驶时间优于本文方法，但平均排队时间是本文方法的 5 倍，说明 GA 和 PSO 算法在寻优过程中陷入了局部最优解，在可行路径中选出了效果相对最好的路径，而 ACO 虽然能够选出更短行驶距离的充电路线，但是未能兼顾排队等待时间的影响。

表 A1　基于不同算法决策的电动汽车充电结果

Table A1　Simulation results of electric vehicle charging with different algorithmic strategies

| 算法 | 仿真耗时/s | 快充需求车辆/辆 | 平均行驶里程/km | 平均行驶时间/km | 平均排队时间/km |
|---|---|---|---|---|---|
| 本文方法 | 121.4 | 658 | 3.64 | 5.66 | 8.75 |
| GA | 43 408.9 | 632 | 5.52 | 8.52 | 14.31 |
| PSO | 25 816.6 | 663 | 6.71 | 10.95 | 14.52 |
| ACO | 2629.2 | 763 | 3.14 | 4.75 | 41.66 |

表 A2　交通路网与配电网节点耦合表

Table A2　Nodal coupling of the transportation road network to the distribution network

| 配电网节点 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 路网节点 | — | 1 | 2 | 3 | 11 | 4 | 5 | 6 | 10 | 7 | 8 | 9 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 配电网节点 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | |
| 路网节点 | 23 | 24 | 26 | 20 | 21 | 22 | 25 | 27 | 29 | 28 | 17 | 18 | 19 | — | — | — | |

表 A3　电动汽车行驶参数设置

Table A3　Electric vehicles driving parameter settings

| 类型 | 数量 | 起始行驶时刻/h | 结束行驶时刻/h | 起始荷电状态 | 停车时长/min |
|---|---|---|---|---|---|
| 私家车 | 800 | $N(8.0,1.33^2)$ | $N(18.5,1.99^2)$ | $N(0.6,0.2^2)$ | $N(180,21^2)$ |
| 出租车 | 200 | $N(8.92,3.41^2)$ | $N(20.92,1.4^2)$ | $N(0.6,0.1^2)$ | $N(12,3.5^2)$ |
| 公务车 | 200 | $U(6,10)$ | $U(18,23)$ | $N(0.6,0.1^2)$ | $N(30,12^2)$ |

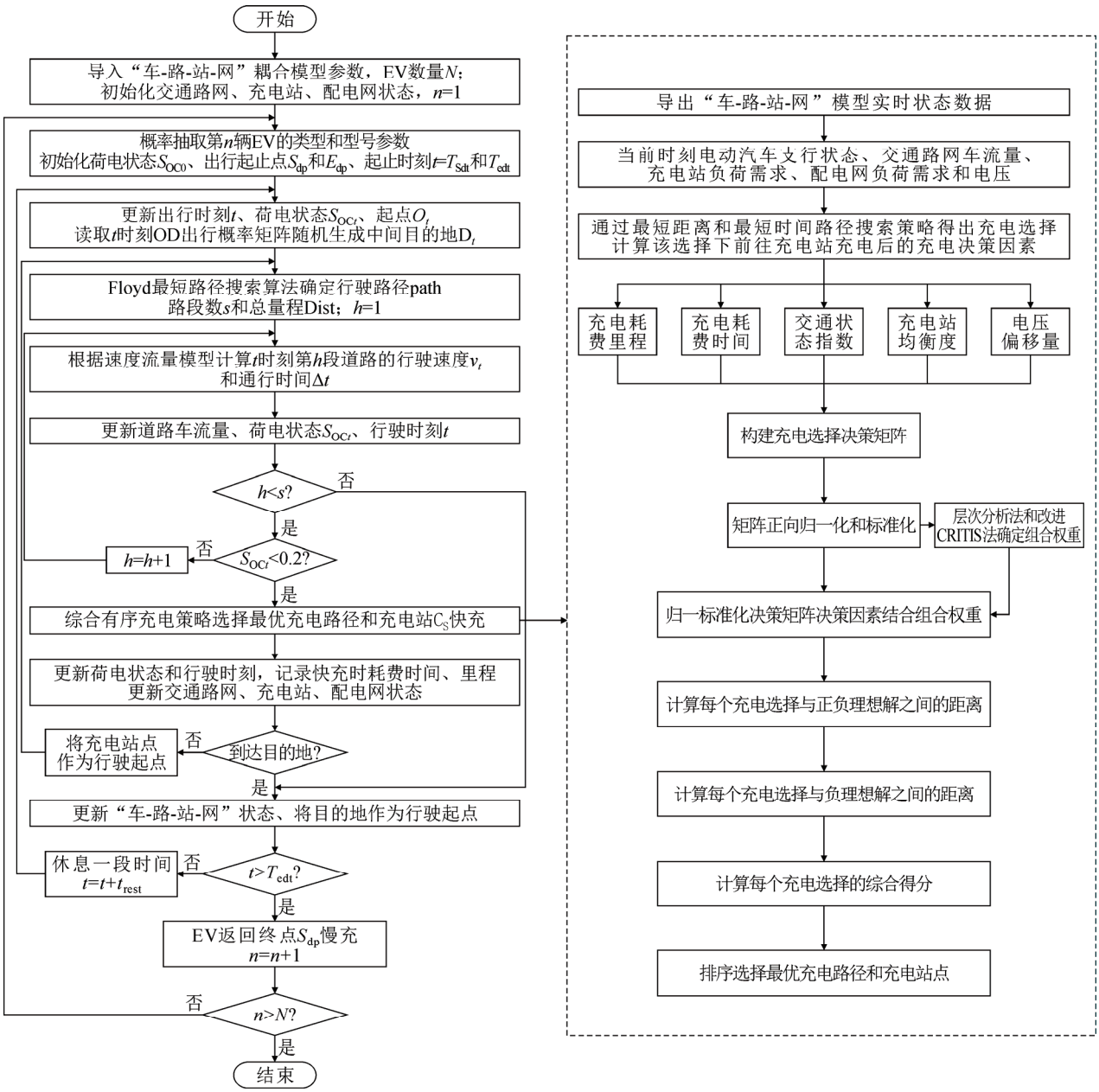



图 A1　基于组合赋权 Topsis 决策的电动汽车有序充电流程

Fig.A1　Sequential charging process for electric vehicles based on combined-assignment Topsis decision-making