

# 计及交通拥堵的电动汽车充电站规划方法

尚龙龙<sup>1</sup>,程俊杰<sup>2</sup>,王伟<sup>2</sup>,熊小伏<sup>2</sup>,慈海<sup>1</sup>,李健<sup>1</sup>,陈星田<sup>3</sup>

(1.深圳供电局有限公司,广东深圳 518000;2.重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;  
3.重庆元虎科技有限公司,重庆 400030)

**摘要:**电动汽车充电站规划,既要考虑充电站接入配电网的成本、电动汽车用户的便捷性,还要考虑交通拥堵对用户出行的影响。根据电动汽车分布特点建立电动汽车时空分布模型,充分考虑城市路网交通拥堵指数对电动汽车用户出行特性及充电站选取的影响,推算出不同时刻电动汽车用户出行时间,从而得出电动汽车入网的容量,以总投资成本、总运行成本和总用户出行成本最小为目标,建立考虑交通拥堵的电动汽车充电站的混合整数二阶锥规划模型。以假定规划区域验证计及交通拥堵的电动汽车充电站规划方法的有效性和可行性。

**关键词:**电动汽车;配电网规划;充电站;交通拥堵;混合整数二阶锥规划

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.008 中图分类号:TM727 文章编号:1673-9140(2023)01-0066-11

## An electric vehicle charging station planning method considering traffic congestion

SHANG Longlong<sup>1</sup>, CHENG Junjie<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, XIONG Xiaofu<sup>2</sup>, CI Hai<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, CHEN Xingtian<sup>3</sup>

(1.Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 2.State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3.Chongqing Yuanhu Technology Co., Ltd., Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The planning of electric vehicle charging stations needs to consider not only the cost of connecting to the power grid but also the convenience of electric vehicle users, as well as the impact of traffic congestion on user travel. Based on the spatial and temporal distribution characteristics of electric vehicles, an electric vehicle spatial-temporal distribution model is established. The impact of traffic congestion on the travel characteristics of electric vehicle users and the selection of charging stations is fully considered, and the electric vehicle entry capacity is calculated at different times. A mixed-integer second-order cone programming model is established to minimize the total investment cost, total operating cost, and total user travel cost, taking into account the impact of traffic congestion on electric vehicle charging station planning. The effectiveness and feasibility of the proposed method for planning electric vehicle charging stations considering traffic congestion are verified through hypothetical planning areas.

**Key words:** electric vehicle; distribution network planning; charging station; traffic congestion; MISOCP

随着化石能源的枯竭与大量使用化石能源而造成环境污染和全球变暖,电动汽车相较于传统化石燃料汽车有低排放、能源利用率高等优点,因而

受到了多国政府的关注,而且出台了相关政策推动电动汽车产业的发展<sup>[1-3]</sup>。据《中国传统燃油车推出时间表研究》报告,中国有望在 2050 年前实现传统

收稿日期:2021-10-08;修回日期:2022-04-14

基金项目:南方电网深圳供电局有限公司科技项目(0900002019030304ZCPW00001)

通信作者:熊小伏(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护与电力系统优化运行研究;E-mail:cquxxf@vip.sina.com

燃油车的全面退出。全国不少城市已经开始在公交车、出租车等领域启动“禁燃”工作。根据规划,先在全国重点地区试点实行公交车电动汽车化,进而实现全国的燃油出租车、公交车被电动汽车取代<sup>[4]</sup>。

随着国家大力推动新能源汽车行业的发展,电动汽车保有量逐年增加,大量电动汽车的充电需求对配电网提出了新的要求<sup>[5]</sup>。电动汽车作为当前配电网中的一种特殊负荷,与传统负荷不同,其具有充电时间不确定性、充电位置不确定性以及用户驾驶行为不确定性等特点<sup>[6]</sup>,大量电动汽车在电网中进行无序充电,必然会影响电网安全可靠运行。大规模的电动汽车接入配电网后,电动汽车用户负荷曲线将与配电网原有的固负荷曲线叠加后将改变原配电网的负荷水平和负荷特性<sup>[7]</sup>,大量电动汽车的充电需求会对配电网提出新的要求。文献[8]建立以配电网投资及运行成本、电动汽车充电站投资及运行成本最小为优化目标的模型,使用带精英策略的改进树形结构编码单亲遗传算法求解充电站的选址定容问题;文献[9]提出一种考虑电动汽车充电负荷和分布式储能系统接入情况下与配电网扩展联合的多阶段规划模型;文献[10]建立电动汽车时空负荷模型和电动汽车充换放储一体站选址定容双层规划模型,并采用粒子群算法和迪克斯特拉算法的组合算法对模型进行求解;文献[11]为达到系统综合成本最小和功率波动最小的目标,建立计及EV有序充放电行为和车主满意度的多目标分层调度数学模型并提出了相适应的求解方法;文献[12]建立考虑安全效能成本的充电站规划模型,并通过向量序优化算法进行求解,最后基于25节点交通系统和IEEE 33节点配电网系统的算例验证了该模型和算法的有效性和可行性;文献[13]分析路网和充电站间的耦合关系并提出一种电动汽车充电路径规划方法。

部分文献提及交通网、电价等因素对电动汽车用户充电行为的影响,并将电动汽车出行时间成本加入目标函数中<sup>[14]</sup>。电动汽车充电站既是配电网的一部分,也是公共服务设施,在进行充电站规划建设及相应的配电网升级改造时,不仅要考虑配电网和充电站的投资运行成本<sup>[15]</sup>,还要考虑充电站选址对于电动汽车用户以及其他汽车用户产生的成本。

对于传统负荷,其接入配电网的位置一般固定,电动汽车用户通过充电站接入配电网,需要确定电动汽车用户如何选择充电站,才能更好地进行充电站的选址定容规划。本文分析电动汽车负荷的时空分布、路网交通情况对用户选择充电站的影响,通过Floyd算法计算电动汽车行驶路径,在满足规划区域内传统负荷和电动汽车充电负荷的前提下,寻找综合考虑用户出行、馈线的新建和扩容、充电站的选址定容的最优规划方案,建立以总投资成本、总运行成本和总用户出行成本最小为目标的混合整数二阶锥模型(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)。

## 1 电动汽车充电负荷模型与路网交通模型

电动汽车作为具有高灵活性的配电网新型负荷,具有充电时间不确定性、充电位置不确定性的特点,交通拥堵信息和充电站建设选址将影响电动汽车目标充电站和行驶路径,进而影响充电站的容量选择与配电网的安全稳定。

### 1.1 电动汽车充电负荷时空分布

规划区域内电动汽车保有量与该区域内人口数量成正比,即

$$N_{ev} = \eta_{ev} N_{peo} \quad (1)$$

式中, $\eta_{ev}$ 为人均电动汽车保有率; $N_{peo}$ 为规划区域内人口总数。

电动汽车用户日行驶里程大致满足对数正态分布,其概率密度函数<sup>[16]</sup>为

$$L(l_{ev}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} l_{ev} \sigma_{ev}} \exp\left[-\frac{(\ln l_{ev} - \mu_{ev})^2}{2\sigma_{ev}^2}\right] \quad (2)$$

式中, $l_{ev}$ 为电动汽车日行驶里程数; $\mu_{ev}$ 为期望值; $\sigma_{ev}$ 为标准差。

电动汽车的日耗电量<sup>[17]</sup>为

$$\Delta E = \frac{E_c l_d}{\eta_{dis}} \quad (3)$$

式中, $\Delta E$ 为电动汽车的日耗电量; $E_c$ 为每公里耗电量; $\eta_{dis}$ 为电动汽车电池放电能耗系数。

电动汽车出发充电时刻的概率密度函数<sup>[18]</sup>为

$$\varphi_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], & (\mu_i - 12) < t \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t+24-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], & 0 < t \leq (\mu_i - 12) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\mu_i$  为均值;  $\sigma_i$  为标准差;  $t$  为电动汽车出发充电时刻。

电动汽车出发前往充电站时的电池电量服从正态分布  $N(0.40, 0.1^2)^{[17]}$ , 为防止过充损害电池寿命, 设置充电至电池容量的 90% 时停止。

## 1.2 路网拓扑模型

分析交通路网拓扑结构是获取充电站负荷的前提, Floyd 算法可以求解任意 2 个路网节点间的最短路径。某交通路网的拓扑结构如图 1 所示。

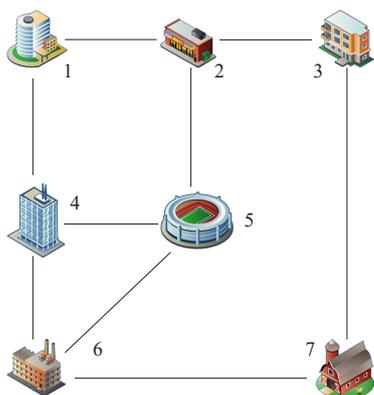


图 1 交通路网拓扑结构

Figure 1 Topology structure of road network

由图 1 可知, 路网中道路均为双行道, 则描述其拓扑结构的距离矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} 0 & l_{12} & \text{inf} & l_{14} & \text{inf} & \text{inf} & \text{inf} \\ l_{21} & 0 & l_{23} & \text{inf} & l_{25} & \text{inf} & \text{inf} \\ \text{inf} & l_{32} & 0 & \text{inf} & \text{inf} & \text{inf} & l_{37} \\ l_{41} & \text{inf} & \text{inf} & 0 & l_{45} & l_{46} & \text{inf} \\ \text{inf} & l_{52} & \text{inf} & l_{54} & 0 & l_{56} & \text{inf} \\ \text{inf} & \text{inf} & \text{inf} & l_{64} & l_{65} & 0 & l_{67} \\ \text{inf} & \text{inf} & l_{73} & \text{inf} & \text{inf} & l_{75} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $d_{ij}$  为各节点间的连接关系, 计算方法为

$$d_{ij} = d_{ji} = \begin{cases} l_{ij}, & (i, j) \in \psi^R \\ 0, & i = j \\ \text{inf}, & (i, j) \notin \psi^R \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\psi^R$  为区域内路网道路的集合;  $l_{ij}$  为道路  $(i, j)$  的长度; inf 表示两路网节点无直接连接。

得到距离矩阵  $D$  后, 基于改进的 Floyd 算法可以计算任意 2 个路网节点间的最短行驶路径, 进而得到电动汽车用户前往目的充电站充电的行驶路径。

## 1.3 交通拥堵模型

电动汽车用户总是倾向于选择花费出行时间最短的充电站作为目的地, 因此目标充电站的选择与路网实时拥堵情况以及目标充电站的容量相关。

理想道路交通条件下, 道路网中的车流密度较小时, 汽车行驶所受限制较小, 车速较快; 随着车流密度加大, 汽车行驶受到限制, 车速开始下降, 车流密度达到最大时, 车速停止。广义车流速度与车流密度关系<sup>[19]</sup>为

$$V_c = V_{fc} \left(1 - \frac{K_c}{K_{zc}}\right)^n \quad (7)$$

式中,  $V_c$  为道路网中统计时间间隔内的汽车平均行驶速度;  $V_{fc}$  为自由流状态下汽车行驶速度;  $K_c$  为汽车平均行驶速度为  $V_c$  时的车流密度;  $K_{zc}$  为最大车流密度。其指数项的存在是由于大车流密度和小车流密度情况下线性模型存在偏差, 需要进行修正。

城市道路网设计时, 较少出现大车流密度和小车流密度的情况, 车流速度与车流密度关系可使用线性模型<sup>[20]</sup>, 即

$$V_c = V_{fc} \left(1 - \frac{K_c}{K_{zc}}\right) \quad (8)$$

交通拥堵指数 (traffic performance index, TPI) 把道路拥堵情况数字化, 是综合反映道路网畅通或拥堵的概念性数值, 其取值范围为 0~10, 且分为 5 级<sup>[21]</sup>, 如表 1 所示。

基于车均行驶速度的交通拥堵指数算法<sup>[22]</sup>为

$$T_{PI} = \left(1 - \frac{V_c}{V_{fc}}\right) \times 10 \quad (9)$$

式中,  $T_{PI}$  为道路交通拥堵指数。

表 1 交通拥堵指数

Table 1 Traffic congestion index table

交通拥堵指数	拥堵情况
0~2	畅通
2~4	基本畅通
4~6	轻度拥堵
6~8	中度拥堵
8~10	严重拥堵

## 2 规划模型

### 2.1 目标函数

配电网规划目标为配电网投资成本、运行成本和总用户出行成本最小,即

$$\min C = C_{\text{inv}} + C_{\text{ope}} + C_{\text{user}} \quad (10)$$

式中, $C$ 为总成本; $C_{\text{inv}}$ 为投资成本; $C_{\text{ope}}$ 为运行成本; $C_{\text{user}}$ 为用户出行成本。

#### 2.1.1 投资成本

投资成本包括需要进行扩容的线路的投资成本,需要新建线路的投资成本,新建充电站的固定投资成本和可变投资成本<sup>[9]</sup>。

$$C_{\text{inv}} = \sum_{ij \in \psi^J} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} C_{\text{Bx}}^J \cdot x_{\text{b},ij}^{\text{Bx},J} + \sum_{ij \in \psi^{\text{K}}} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} C_{\text{Bx}}^J \cdot x_{\text{k},ij}^{\text{Bx},J} + \sum_{p \in \psi^{\text{C}}} (C_{\text{fixed}}^p \cdot x_p^{\text{C}} + C_{\text{CAB}}^p \cdot P_p^{\text{C}}) \quad (11)$$

式中, $\psi^J$ 为可能需要新建的线路的集合; $\psi^{\text{K}}$ 为可能需要扩容的线路的集合; $\psi^{\text{Bx}}$ 为线路扩容或者新建的备选线型的集合; $\psi^{\text{C}}$ 为充电站备选站址的集合; $C_{\text{Bx}}^J$ 为线路扩容或者新建的第 $J$ 种线型的投资成本; $x_{\text{b},ij}^{\text{Bx},J}$ 为新建线路 $ij$ 选择线型 $J$ 的0-1变量,若为1则新建,否则不新建; $x_{\text{k},ij}^{\text{Bx},J}$ 为扩容线路 $ij$ 选择线型 $J$ 的0-1变量,若为1则扩容,否则不扩容; $C_{\text{fixed}}^p$ 为节点 $p$ 新建充电站的固定成本; $C_{\text{CAB}}^p$ 为节点 $p$ 新建充电站的单位可变投资; $P_p^{\text{C}}$ 为节点 $p$ 新建充电站的充电容量; $x_p^{\text{C}}$ 为节点 $p$ 新建充电站的0-1变量,若为1则新建,否则不新建。

#### 2.1.2 运行成本

总运行成本包括配电网运行成本、充电站运行成本。

$$C_{\text{ope}} = 365 \left( \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \psi^J} P_{e,t} \cdot f_{ij,t} \cdot r_{ij} + \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \psi^{\text{K}}} P_{e,t} (f_{ij,t} \cdot r_{ij} - f_{i,t}^{\text{or}} \cdot r_{ij}^{\text{or}}) + \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \psi^{\text{OR}}} P_{e,t} \cdot (f_{ij,t} \cdot r_{ij} - f_{i,t}^{\text{or}} \cdot r_{ij}^{\text{or}}) + \sum_{p \in \psi^{\text{C}}} O_p \cdot P_p^{\text{C}} \right) \quad (12)$$

式中, $T$ 为规划阶段的集合,取24 h; $P_{e,t}$ 为第 $t$ 小时的电价; $f_{i,t}^{\text{or}}$ 、 $f_{ij,t}$ 分别为充电站建设前后线路 $ij$ 在第 $t$ 小时的电流平方; $r_{ij}^{\text{or}}$ 、 $r_{ij}$ 分别为充电站建设前后线路 $ij$ 的电阻; $\psi^{\text{OR}}$ 为不需要扩容的线路的集合; $O_p$ 为充电站 $p$ 的单位年运行成本。

式(12)中的新建线路和扩容线路的阻抗信息

与其选择的线型相关,为未知量,且线路电流为未知量,其乘积 $f_{ij,t} \cdot r_{ij}$ 为二次项使得模型为非线性模型。线路电流为连续变量,而新建线路和扩容线路的阻抗信息包含0-1变量,可将其乘积进行线性化处理,保证模型的线性特性。

1) 对于新建线路,式(12)中线路 $ij$ 在第 $t$ 小时流过电流的平方和其电阻的乘积 $f_{ij,t} \cdot r_{ij}$ ,导致模型为非线性,对其进行如下处理:

$$f_{ij,t} \cdot r_{ij} = f_{ij,t} \cdot L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot x_{\text{b},ij}^{\text{Bx},J}, \forall ij \in \psi^J \quad (13)$$

式中, $L_{ij}$ 为线路 $ij$ 的长度, $r_{\text{Bx},J}$ 为备选线型 $J$ 单位长度的电阻值。其中, $f_{ij,t}$ 为连续变量, $x_{\text{b},ij}^{\text{Bx},J}$ 为0-1变量,可引入变量 $w_{\text{b},ij}^{\text{J,fr}}$ 替换式(13)中的 $f_{ij,t} \cdot x_{\text{b},ij}^{\text{Bx},J}$ 对模型进行线性化处理:

$$w_{\text{b},ij}^{\text{J,fr}} = f_{ij,t} \cdot x_{\text{b},ij}^{\text{Bx},J}, \forall ij \in \psi^J \quad (14)$$

$$f_{ij,t} \cdot r_{ij} = L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot w_{\text{b},ij}^{\text{J,fr}}, \forall ij \in \psi^J \quad (15)$$

并引入相应的约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq w_{\text{b},ij}^{\text{J,fr}} \leq M \cdot x_{\text{b},ij}^{\text{Bx},J}, & \forall ij \in \psi^J \\ f_{ij,t} - w_{\text{b},ij}^{\text{J,fr}} \leq M \cdot (1 - x_{\text{b},ij}^{\text{Bx},J}), & \forall ij \in \psi^J \end{cases} \quad (16)$$

式中, $M$ 为一个充分大的正数。

2) 对于扩容线路,式(12)中线路 $ij$ 在第 $t$ 小时流过电流的平方和其电阻的乘积 $f_{ij,t} \cdot r_{ij}$ ,导致模型为非线性,对其进行如下处理:

$$f_{ij,t} \cdot r_{ij} = f_{ij,t} \cdot L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot x_{\text{k},ij}^{\text{Bx},J}, \forall ij \in \psi^{\text{K}} \quad (17)$$

其中, $f_{ij,t}$ 为连续变量, $x_{\text{k},ij}^{\text{Bx},J}$ 为0-1变量,可引入变量 $w_{\text{k},ij}^{\text{J,fr}}$ 替换式(17)中的 $f_{ij,t} \cdot x_{\text{k},ij}^{\text{Bx},J}$ 对模型进行线性化处理:

$$w_{\text{k},ij}^{\text{J,fr}} = f_{ij,t} \cdot x_{\text{k},ij}^{\text{Bx},J}, \forall ij \in \psi^{\text{K}} \quad (18)$$

$$f_{ij,t} \cdot r_{ij} = L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot w_{\text{k},ij}^{\text{J,fr}}, \forall ij \in \psi^{\text{K}} \quad (19)$$

并引入相应的约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq w_{\text{k},ij}^{\text{J,fr}} \leq M \cdot x_{\text{k},ij}^{\text{Bx},J}, & \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ f_{ij,t} - w_{\text{k},ij}^{\text{J,fr}} \leq M \cdot (1 - x_{\text{k},ij}^{\text{Bx},J}), & \forall ij \in \psi^{\text{K}} \end{cases} \quad (20)$$

将式(12)改写为

$$C_{\text{ope}} = 365 \left( \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \psi^J} P_{e,t} \cdot L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot w_{\text{b},ij}^{\text{J,fr}} + \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \psi^{\text{K}}} P_{e,t} (L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot w_{\text{k},ij}^{\text{J,fr}} - f_{i,t}^{\text{or}} \cdot r_{ij}^{\text{or}}) + \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \psi^{\text{OR}}} P_{e,t} (f_{ij,t} \cdot r_{ij} - f_{i,t}^{\text{or}} \cdot r_{ij}^{\text{or}}) + \sum_{p \in \psi^{\text{C}}} O_p \cdot P_p^{\text{C}} \right) \quad (21)$$

### 2.1.3 出行成本

用户出行成本包括电动汽车用户的路上成本和对路径上的其他汽车产生的出行成本。

$$C_{\text{user}} = C_{\text{ev}} + C_{\text{other}} \quad (22)$$

$$C_{\text{ev}} = 365 \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{p \in \psi^c} P_{\text{tri},t} (T_{n,p,t}^{\text{Road}} + T_{n,p,t}^{\text{Cha}}) N_{n,t}^{\text{ev}} \cdot x_{n,p,t} \quad (23)$$

$$C_{\text{other}} = 365 \sum_{t=1}^T \sum_{r \in \psi^b} P_{\text{tri},t} \cdot K_{r,t}^{\text{car}} v_{r,t} \cdot \Delta T_{r,t} \quad (24)$$

式(22)~(24)中,  $C_{\text{ev}}$ 为电动汽车用户的路上成本;  $C_{\text{other}}$ 为电动汽车用户出行时对路径上的其他汽车产生的出行成本;  $N$ 为规划区域内的电动汽车负荷点数;  $P_{\text{tri},t}$ 为第  $t$  小时用户单位出行时间成本;  $T_{n,p,t}^{\text{Road}}$ 为第  $t$  小时从电动汽车负荷节点  $n$  行驶到目标充电站  $p$  所花费的时间;  $T_{n,p,t}^{\text{Cha}}$ 为第  $t$  小时从电动汽车负荷节点  $n$  到目标充电站  $p$  处充电所花费的时间;  $N_{n,t}^{\text{ev}}$ 为第  $t$  小时电动汽车负荷节点  $n$  需要充电的电动汽车数量;  $x_{n,p,t}$ 为第  $t$  小时电动汽车负荷节点  $n$  的电动汽车选择充电站  $p$  为目标充电站的0-1变量,若为1则选择,否则不选择;  $K_{r,t}^{\text{car}}$ 为第  $t$  小时道路  $r$  上的其他汽车车流密度;  $v_{r,t}$ 为第  $t$  小时道路  $r$  上的车流速度;  $\Delta T_{r,t}$ 为第  $t$  小时电动汽车用户上路给其他汽车用户造成的出行时长增加。

$$P_{\text{tri},t} = \eta_{\text{tw}} W \quad (25)$$

式中,  $\eta_{\text{tw}}$ 为时间价值折算系数;  $W$ 为人均小时工资收入<sup>[23]</sup>。

$$T_{n,p,t}^{\text{Road}} = \sum_{r \in \psi_{n,p,t}} \frac{l_r}{v_{r,t}} \quad (26)$$

式中,  $l_r$ 为道路  $r$  的长度;  $\psi_{n,p,t}$ 为第  $t$  小时电动汽车负荷节点  $n$  的电动汽车选择充电站  $p$  为目标充电站的行驶路径集合。

$$N_{n,t}^{\text{ev}} = \varphi_t(t) \frac{\sum_{m=1}^{N_n^{\text{ev}}} \Delta E_{n,m}}{E_{\text{ev,avecha}}} \quad (27)$$

式中,  $N_{n,t}^{\text{ev}}$ 为电动汽车负荷节点  $n$  的电动汽车数量;  $\Delta E_{n,m}$ 为电动汽车负荷节点  $n$  第  $m$  辆电动汽车的日耗电量;  $E_{\text{ev,avecha}}$ 为电动汽车负荷节点  $n$  电动汽车的平均充电量。

$$K_{r,t}^{\text{C}} = K_{r,t}^{\text{car}} + \sum_{n=1}^N \sum_{p \in \psi^c} \frac{N_{n,t}^{\text{ev}}}{v_{r,t}} \cdot x_{n,p,t}, r \in \psi_{n,p,t} \quad (28)$$

式中,  $K_{r,t}^{\text{C}}$ 为第  $t$  小时道路  $r$  上的车流密度。

$$\Delta T_{r,t} = \frac{l_r}{V_{r,\text{fc}} \left( \frac{K_{r,z} - K_{r,t}^{\text{C}}}{K_{r,z}} \right)} - \frac{l_r}{v_{r,t}} \quad (29)$$

式中,  $V_{r,\text{fc}}$ 为道路  $r$  的车辆自由流速度;  $K_{r,z}$ 为道路  $r$  的最大车流密度。

式(29)中的倒数项使得模型为非线性,各个时段有充电需求的电动汽车数量远小于交通网中的交通流量,为保证模型的线性性,降低求解难度,可对式(29)进行线性化,即

$$\Delta T_{r,t} = (-1) \frac{l_r}{v_{r,t}^2} (V_{r,\text{fc}} \left( \frac{K_{r,z} - K_{r,t}^{\text{C}}}{K_{r,z}} \right) - v_{r,t}) \quad (30)$$

## 2.2 约束条件

计及交通拥堵的电动汽车充电站规划模型的约束条件主要包括配电网运行约束、充电站容量约束和变量间的逻辑约束。本文模型考虑的是在已有配电网架的基础上进行充电站选址定容规划,新建充电站通过馈线接入已有配电网架中,此种情况下,配电网为辐射状。

### 2.2.1 配电网运行约束

配电网运行约束包括节点功率平衡、线路载流约束和配电网节点电压约束<sup>[24]</sup>。

1) 节点功率平衡。

$$P_{ij,t} = \sum_{k:(j,k) \in C_j} P_{jk,t} + f_{ij,t} \cdot r_{ij} + p_{j,t}^{\text{D}} + p_{j,t}^{\text{Cha}} \quad (31)$$

$$Q_{ij,t} = \sum_{k:(j,k) \in C_j} Q_{jk,t} + f_{ij,t} \cdot x_{ij} + q_{j,t}^{\text{D}} + q_{j,t}^{\text{Cha}} \quad (32)$$

式中,  $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为线路  $ij$ (节点  $i$  到节点  $j$ ) 在第  $t$  小时的首端有功功率和无功功率;  $C_j$ 为与节点  $j$  相连线路的集合;  $x_{ij}$ 为线路  $ij$  的电抗;  $p_{j,t}^{\text{D}}$ 、 $q_{j,t}^{\text{D}}$ 分别为节点  $j$  在第  $t$  小时的有功和无功负荷;  $p_{j,t}^{\text{Cha}}$ 、 $q_{j,t}^{\text{Cha}}$ 分别为节点  $j$  在第  $t$  小时的电动汽车充电站的有功和无功负荷。

式(31)、(32)中,当线路  $ij$  为新建线路或者扩容线路时,  $f_{ij,t} \cdot r_{ij}$  和  $f_{ij,t} \cdot x_{ij}$  为二次项,但均可视为0-1变量与连续变量的乘积,其中  $f_{ij,t} \cdot r_{ij}$  的线性化处理方法见式(13)~(20)。

$$\begin{cases} f_{ij,t} \cdot x_{ij} = f_{ij,t} L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} x_{\text{Bx},J} \cdot x_{\text{b},ij}^{\text{Bx},J}, \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ f_{ij,t} \cdot x_{ij} = f_{ij,t} L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} x_{\text{Bx},J} \cdot x_{\text{k},ij}^{\text{Bx},J}, \forall ij \in \psi^{\text{K}} \end{cases} \quad (33)$$

由式(33)可知,  $f_{ij,t} \cdot x_{ij}$  与  $f_{ij,t} \cdot r_{ij}$  变量完全相同,故其可用同样方法进行线性化处理。

将式(31)、(32)改写为

$$\left\{ \begin{aligned} P_{ij,t} &= \sum_{k:(j,k) \in C} P_{jk,t} + L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{b,ij}^{J,\text{fr}} + \\ &\quad p_{j,t}^{\text{D}} + p_{j,t}^{\text{Cha}}, \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ P_{ij,t} &= \sum_{k:(j,k) \in C} P_{jk,t} + L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{k,ij}^{J,\text{fr}} + \\ &\quad p_{j,t}^{\text{D}} + p_{j,t}^{\text{Cha}}, \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ P_{ij,t} &= \sum_{k:(j,k) \in C} P_{jk,t} + f_{ij,t} \cdot r_{ij} + p_{j,t}^{\text{D}} + \\ &\quad p_{j,t}^{\text{Cha}}, \forall ij \in \psi^{\text{OR}} \end{aligned} \right. \quad (34)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{ij,t} &= \sum_{k:(j,k) \in C} Q_{jk,t} + L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} x_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{b,ij}^{J,\text{fr}} + \\ &\quad q_{j,t}^{\text{D}} + q_{j,t}^{\text{Cha}}, \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ Q_{ij,t} &= \sum_{k:(j,k) \in C} Q_{jk,t} + L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} x_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{k,ij}^{J,\text{fr}} + \\ &\quad q_{j,t}^{\text{D}} + q_{j,t}^{\text{Cha}}, \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ Q_{ij,t} &= \sum_{k:(j,k) \in C} Q_{jk,t} + f_{ij,t} \cdot x_{ij} + q_{j,t}^{\text{D}} + \\ &\quad q_{j,t}^{\text{Cha}}, \forall ij \in \psi^{\text{OR}} \end{aligned} \right. \quad (35)$$

2) 线路电流约束。

对于配电网中的所有线路,在其运行时均需满足通过线路的电流幅值小于其所使用线型的最大允许通过电流。

$$f_{ij,t} \geq \frac{(P_{ij,t})^2 + (Q_{ij,t})^2}{u_{i,t}} \quad (36)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} f_{\text{Bx}}^{J,\text{max}} x_{b,ij}^{\text{Bx},J} &\geq f_{ij,t}, \quad ij \in \psi^{\text{J}} \\ \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} f_{\text{Bx}}^{J,\text{max}} x_{k,ij}^{\text{Bx},J} &\geq f_{ij,t}, \quad ij \in \psi^{\text{K}} \\ f_{ij}^{\text{max}} &\geq f_{ij,t}, \quad ij \in \psi^{\text{OR}} \end{aligned} \right. \quad (37)$$

式中,  $f_{\text{Bx}}^{J,\text{max}}$  为备选线型  $J$  载流量平方的上限;  $f_{ij}^{\text{max}}$  为线路  $ij$  载流量平方的上限;  $u_{i,t}$  为第  $t$  小时节点  $i$  电压的平方。式(36)右边含有二次部分,可以改写为如下的二阶锥约束:

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ f_{ij,t} - u_{i,t} \end{matrix} \right\|_2 \leq f_{ij,t} + u_{i,t} \quad (38)$$

3) 节点电压约束。

配电网运行时,各个节点均需满足电压幅值上下限约束,以保证配电网运行时的安全。

$$u_{j,t} = u_{i,t} - 2(P_{ij,t} \cdot r_{ij} + Q_{ij,t} \cdot x_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \left( \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{u_{i,t}} \right) \quad (39)$$

$$u^{\text{min}} \leq u_{i,t} \leq u^{\text{max}} \quad (40)$$

式中,  $u^{\text{max}}$ 、 $u^{\text{min}}$  分别为节点电压平方的上限和下限。式(39)含有二次项,但是其二次项远小于其他项,故将其忽略,将式(39)化为式(41),保证模型的线性性。

$$u_{j,t} = u_{i,t} - 2(P_{ij,t} \cdot r_{ij} + Q_{ij,t} \cdot x_{ij}) \quad (41)$$

式中,当线路  $ij$  为新建线路或者扩容线路时,  $P_{ij,t} \cdot r_{ij}$ 、 $Q_{ij,t} \cdot x_{ij}$  为二次项,均可视为 0-1 变量与连续变量的乘积,可对其进行线性化处理,处理方法与  $f_{ij,t} \cdot x_{ij}$  相似,故不作赘述,只列出相关公式。

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_{b,ij}^{J,\text{pr}} &= P_{ij,t} \cdot x_{b,ij}^{\text{Bx},J}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ P_{ij,t} \cdot r_{ij} &= L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{b,ij}^{J,\text{pr}}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ \omega_{b,ij}^{J,\text{qx}} &= Q_{ij,t} \cdot x_{b,ij}^{\text{Bx},J}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ Q_{ij,t} \cdot x_{ij} &= L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} x_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{b,ij}^{J,\text{qx}}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ \omega_{k,ij}^{J,\text{pr}} &= P_{ij,t} \cdot x_{k,ij}^{\text{Bx},J}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ P_{ij,t} \cdot r_{ij} &= L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{k,ij}^{J,\text{pr}}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ \omega_{k,ij}^{J,\text{qx}} &= Q_{ij,t} \cdot x_{k,ij}^{\text{Bx},J}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ Q_{ij,t} \cdot x_{ij} &= L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} x_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{k,ij}^{J,\text{qx}}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{K}} \end{aligned} \right. \quad (42)$$

引入相应约束条件:

$$\left\{ \begin{aligned} 0 \leq \omega_{b,ij}^{J,\text{pr}} &\leq M \cdot x_{b,ij}^{\text{Bx},J}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ P_{ij,t} - \omega_{b,ij}^{J,\text{pr}} &\leq M \cdot (1 - x_{b,ij}^{\text{Bx},J}), \quad \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ 0 \leq \omega_{b,ij}^{J,\text{qx}} &\leq M \cdot x_{b,ij}^{\text{Bx},J}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ Q_{ij,t} - \omega_{b,ij}^{J,\text{qx}} &\leq M \cdot (1 - x_{b,ij}^{\text{Bx},J}), \quad \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ 0 \leq \omega_{k,ij}^{J,\text{pr}} &\leq M \cdot x_{k,ij}^{\text{Bx},J}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ P_{ij,t} - \omega_{k,ij}^{J,\text{pr}} &\leq M \cdot (1 - x_{k,ij}^{\text{Bx},J}), \quad \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ 0 \leq \omega_{k,ij}^{J,\text{qx}} &\leq M \cdot x_{k,ij}^{\text{Bx},J}, \quad \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ Q_{ij,t} - \omega_{k,ij}^{J,\text{qx}} &\leq M \cdot (1 - x_{k,ij}^{\text{Bx},J}), \quad \forall ij \in \psi^{\text{K}} \end{aligned} \right. \quad (43)$$

将式(41)改写为

$$\left\{ \begin{aligned} u_{j,t} &= u_{i,t} - 2 \left( \begin{matrix} L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{b,ij}^{J,\text{pr}} + \\ L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} x_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{b,ij}^{J,\text{qx}} \end{matrix} \right), \quad \forall ij \in \psi^{\text{J}} \\ u_{j,t} &= u_{i,t} - 2 \left( \begin{matrix} L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} r_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{k,ij}^{J,\text{pr}} + \\ L_{ij} \sum_{J \in \psi^{\text{Bx}}} x_{\text{Bx},J} \cdot \omega_{k,ij}^{J,\text{qx}} \end{matrix} \right), \quad \forall ij \in \psi^{\text{K}} \\ u_{j,t} &= u_{i,t} - 2(P_{ij,t} \cdot r_{ij} + Q_{ij,t} \cdot x_{ij}), \quad \forall ij \in \psi^{\text{OR}} \end{aligned} \right. \quad (44)$$

2.2.2 充电站容量约束

1) 充电站容量需求约束。

规划区域内的充电站的容量应能够满足该任意时刻前往该充电站进行充电的电动汽车的需求。



电动汽车电池放电能耗系数  $\eta_{dis}$  取 0.9; 充电站充电桩功率为 45 kW, 充电桩的充电效率为 0.9, 各负荷节点功率因数取 0.95; 电动汽车用户日行驶里程概率密度函数期望值  $\mu_{ev}$  取 3.20, 标准差  $\sigma_{ev}$  取 0.88; 电动汽车出发充电时刻的概率密度函数均值  $\mu_t$  取 17.6, 标准差  $\sigma_t$  取 3.4; 工作、商务出行小时时间价值折算系数取 1.33, 其他非工作出行小时时间价值折算系数取 0.3, 人均工资收入  $W$  取 40 元/h, 本文暂不考虑不同充电站内充电电价或服务费的差异对电动汽车出行的影响。主、次主干道路车辆自由流速率分别为  $V_{fcz}=55.6$ 、 $V_{fcc}=45.8$  km/h<sup>[26]</sup>; 主、次主干道最大车流密度分别为  $K_{zcz}=293$ 、 $K_{zcc}=214$  辆/km<sup>[27]</sup>; 使用杭州市典型日的城市道路拥堵系数<sup>[28]</sup>, 规划时间尺度为 1 h; 深圳市峰谷电价如表 4 所示。

表 2 路网节点常住人口数

Table 2 Permanent population of road network nodes

常住人口数/人	路网节点号
500	1、2、5、6、7、8、9、46、48
1 000	4、10、11、12、14、20、22、24、27、30、31、 35、39、41、43、45、47
2 000	3、13、15、16、17、18、19、21、23、25、 26、28、29、32、33、34、36、37、38、40、42、44

表 3 配电网节点坐标及负荷

Table 3 Distribution network node coordinates and loads

节点	X/ km	Y/ km	负荷/ MW	节点	X/ km	Y/ km	负荷/ MW
1	4.5	5.5	0.00	19	2.5	1.5	1.60
2	4.5	6.5	0.90	20	2.5	0.5	2.20
3	3.5	6.5	1.15	21	1.5	2.5	1.50
4	5.5	6.5	1.05	22	1.5	1.5	0.60
5	5.5	5.5	1.10	23	2.5	3.5	1.50
6	6.5	5.5	1.20	24	1.5	3.5	0.40
7	5.5	4.5	0.75	25	6.5	2.5	0.00
8	6.5	4.5	1.35	26	6.5	3.5	0.85
9	4.5	4.5	0.85	27	5.5	3.5	0.95
10	4.5	3.5	1.15	28	7.5	3.5	0.75
11	3.5	4.5	0.65	29	7.5	2.5	1.35
12	2.5	4.5	1.40	30	8.5	3.5	0.65
13	3.5	5.5	0.70	31	5.5	2.5	2.10
14	2.5	5.5	1.25	32	5.5	1.5	2.20
15	2.5	2.5	0.00	33	6.5	1.5	1.05
16	3.5	2.5	2.40	34	7.5	1.5	0.85
17	3.5	1.5	1.15	35	6.5	0.5	0.55
18	3.5	0.5	1.35				

表 4 用户峰谷电价

Table 4 Time-of-use tariff for customers

时段	电价/(元/(kW·h))
谷时	00:00—08:00 08:00—14:00 0.337 7
平时	17:00—19:00 22:00—24:00 0.664 8
高峰	14:00—17:00 19:00—22:00 1.090 0

实际情况下, 由于城市规划的限制, 电动汽车充电站并不能在任意位置建设, 只能选择在特定的地方进行投资建设, 本文假设的充电站备选站址如表 5 所示。当线路容量不足时, 可以对通过更换馈线扩大线路载流量; 新建充电站时, 需要新建线路将其与配电网连接供电。线路扩容与线路新建可选线路参数如表 6 所示。

表 5 充电站备选站址参数

Table 5 Parameters of alternative sites for charging station

备选站址	X/ km	Y/ km	拟接入配网节点	投资成本/(万元/(MV·A))		单位运行成本/(万元/(MV·A))	容量约束/(MV·A)	
				固定投资	单位可变投资		下限	上限
1	5	6	5	100	10	10	0	10
2	2	5	12	100	10	10	0	10
3	4	4	9	100	10	10	0	10
4	7	4	26	100	10	10	0	10
5	1	2	39	100	10	10	0	10
6	8	2	34	100	10	10	0	10
7	4	1	17	100	10	10	0	10

表 6 扩容及新建线路可选线路参数

Table 6 Optional line parameters for capacity expansion and new lines

线路类型	载流量/ A	$r_{ij}/$ ( $\Omega$ /km)	$x_{ij}/$ ( $\Omega$ /km)	造价/ (万元/km)
1	194	0.45	0.358	25
2	372	0.17	0.365	35

以本文所建立模型, 对规划区电动汽车充电站选址定容进行求解, 设置求解精度为 0.01, 在 CPU 为 Intel Core i5-7500、内存为 8G 的计算机上进行求解, 求解时间约为 149 s, 计算结果如表 7 所示。由表 7 可知, 当充电站的建设数量为 6 时, 该规划方案的总成本最小, 为 5 028.78 万元。规划结果选择在备选站址 2~7 投资建设充电站, 各个充电站的建设容量如表 8 所示, 充电站接入配电网位置如图 4 所示。

表7 各规划方案的总成本

Table 7 Total cost of each planning option 万元

充电站建设个数	$C_{inv}$	$C_{ope}$	$C_{ev}$	$C_{other}$	总成本
3	601.55	1 125.57	3 107.67	477.49	5 312.28
4	726.49	978.92	3 008.31	424.61	5 138.33
5	845.87	966.43	2 882.24	354.09	5 048.59
6	979.23	933.39	2 804.25	311.90	5 028.78
7	1 103.01	852.39	2 777.60	298.67	5 031.67

表8 各充电站备选站址容量配置

Table 8 Alternative site capacity configuration for each charging station MV · A

备选站址	建设容量	节点	备选站址	建设容量	节点
1	0.000	—	5	1.829	39
2	1.975	36	6	1.974	40
3	2.306	37	7	1.234	41
4	1.810	38			

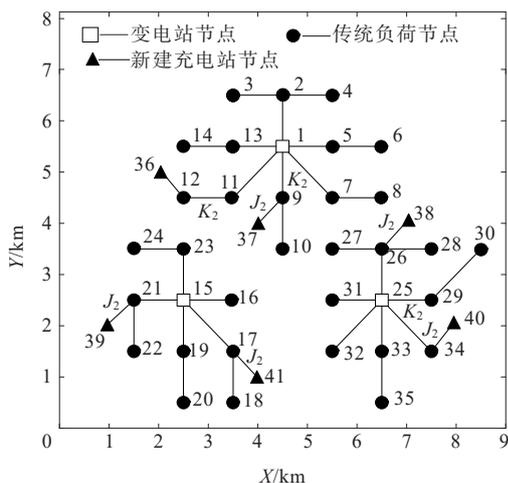


图4 充电站接入位置规划结果

Figure 4 Charging station access location planning results

由表7可知,随着建设的充电站数量增加,由于新建充电站的固定投资成本及其相应的线路新建成本的投入导致投资成本增加;由于网损与线路电流的非线性关系,运行成本将会降低;增加建设的充电站可以对其所在地附近的电动汽车用户减少出行时间以及其充电行为对路网资源的占用,其出行成本将会降低,同时电动汽车用户出行时对路径上的其他汽车产生的出行成本也会降低。

当不考虑用户出行成本时,根据本文所建立模型,以投资成本  $C_{inv}$  和运行成本  $C_{ope}$  最小为目标,求

解结果如表9所示。由表9可知,不考虑总用户出行成本时,当新建充电站数量为4时,投资成本和运行成本最小,为1 663.78万元,规划结果选择在备选站址1、3、5、6投资建设充电站,各个充电站的建设容量如表10所示。此时,电动汽车用户出行成本为4 011.79万元,对路径上的其他汽车产生的出行成本为939.34万元。若考虑用户出行成本,规划结果总成本为6 614.89万元,大于本文所建立的考虑交通拥堵的电动汽车规划模型的结果,并且显著降低电动汽车用户的出行成本及电动汽车用户出行时对路径上的其他汽车产生的出行成本。

表9 不考虑用户成本时的规划结果

Table 9 Planning results without considering user costs 万元

充电站建设个数	$C_{inv}$	$C_{ope}$	$C_{ev}$	$C_{other}$	总成本
4	728.07	935.69	4 011.79	939.34	6 614.89

表10 不考虑用户成本时充电站备选站址容量配置

Table 10 Capacity allocation of alternative sites for charging stations without considering user costs MV · A

备选站址	建设容量	节点	备选站址	建设容量	节点
1	2.703	36	5	2.579	38
2	0.000	—	6	2.633	39
3	3.044	37	7	0.000	—
4	0.000	—			

从上述分析可知,路网结构以及相应的道路交通信息会影响电动汽车用户充电时目标充电站的选择以及驾驶前往目标充电站的行驶路径。电动汽车充电站作为一种公共服务设施,在进行配电网充电站投资建设规划时,不仅需要考虑到配电网和充电站的投资成本,还需要考虑其选址对于电动汽车用户充电行为产生的出行成本。本文所提出的模型考虑了这些因素的影响及相应的约束,寻找最优的规划方案,可以作为配网规划与运行的参考。

## 4 结语

本文基于路网结构、交通拥堵系数、配电网结构及电动汽车出行特性,提出一种计及交通拥堵的电动汽车充电站规划方法,通过算例仿真,得到如下结论:

1) 电动汽车充电站作为公共服务设施,其选址建设需要兼顾电力公司、充电站、电动汽车用户和路网上的其他车辆的利益,实现综合成本最小化;

2) 算例结果验证了所提规划模型的经济性,在规划阶段兼顾出行成本,能够显著降低电动汽车用户充电行为的出行成本及其出行时对路径上的其他汽车产生的出行成本;

3) 站在城市规划的角度,通过充电站的选址来调控电动汽车的行驶路径,可以调节路网拥堵情况,为路网中行驶的车流带来便利。

充电站负荷曲线具有明显的峰谷特性,下一步将研究储能参与充电站运营的控制策略,通过储能平滑充电站负荷曲线减少运行成本,且通过电价差套利。

#### 参考文献:

- [1] 蔡黎,张权文,代妮娜,等.规模化电动汽车接入主动配电网研究进展综述[J].智慧电力,2021,49(6):75-82.  
CAI Li, ZHANG Quanwen, DAI Nina, et al. Review on research progress of large-scale electric vehicle access to active distribution network[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 75-82.
- [2] 胡思洋,杨健维,廖凯,等.计及大规模电动汽车接入的配电网故障分析方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(16):33-46.  
HU Siyang, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Fault analysis method for an urban distribution network considering large-scale electric vehicle access[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 33-46.
- [3] 余潇潇,宋福龙,周原冰,等.“新基建”对中国“十四五”电力需求和电网规划的影响分析[J].中国电力,2021,54(7):11-17.  
YU Xiaoxiao, SONG Fulong, ZHOU Yuanbing, et al. Investigations on the impact of new infrastructure on electricity forecast and power system planning during the 14th five-year plan period[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 11-17.
- [4] 安锋,康利平,秦兰芝,等.中国传统燃油汽车退出时间表研究[J].国际石油经济,2019,27(5):1-8.  
AN Feng, KANG Liping, QIN Lanzhi, et al. Study on the phasing-out timetable of China's traditional ICE-vehicles [J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(5): 1-8.
- [5] 王晞,汪伟,王海燕,等.计及用户电池损耗的电动汽车分布式两阶段调度策略[J].电测与仪表,2022,59(1):120-126.  
WANG Xi, WANG Wei, WANG Haiyan, et al. Distributed two-stage scheduling strategy of EV considering user battery consumption[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 120-126.
- [6] 程杉,许林峰,孙伟斌,等.基于电压稳定性的电动汽车充电站最优规划[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):3-12.  
CHENG Shan, XU Linfeng, SUN Weibin, et al. Optimal planning of charging stations for electric vehicles based on voltage stability of distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 3-12.
- [7] 谭瑾,王勇,马洲俊,等.考虑规模化电动汽车负荷的柔性台区安全经济运行边界[J].电力工程技术,2021,40(5):25-33.  
TAN Jin, WANG Yong, MA Zhoujun, et al. Security-economy operational boundary of flexible district considering large-scale EV charging loads[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 25-33.
- [8] 陈婷,卫志农,吴霜,等.考虑电动汽车充电站选址定容的配电网规划[J].电力系统及其自动化学报,2013,25(3):1-7.  
CHEN Ting, WEI Zhinong, WU Shuang, et al. Distribution network planning by considering siting and sizing of electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(3): 1-7.
- [9] 贾龙,胡泽春,宋永华,等.储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):73-84.  
JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-84.
- [10] 何晨可,韦钢,朱兰,等.电动汽车充换放储一体化电站选址定容[J].中国电机工程学报,2019,39(2):479-489+645.  
HE Chenke, WEI Gang, ZHU Lan. Locating and sizing of electric vehicle charging-swapping-discharging-storage integrated station[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 479-489+645.
- [11] 程杉,汪业乔,廖玮霖,等.含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):63-71.  
CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 63-71.
- [12] 徐雄军,朱溥楠,徐鸣,等.考虑安全效能成本的电动汽车充电站多目标规划方法[J].电网与清洁能源,2021,37(12):132-138.  
XU Xiongjun, ZHU Punan, XU Ming, et al. A multi objective programming method of electric vehicle

- charging stations considering safety efficiency cost[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(12): 132-138.
- [13] 杨恬恬. 车一路一站多信息交互下电动汽车充电路径规划[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
YANG Tiantian. Charging path planning for electric vehicles under multi-information interaction of vehicle-road-station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 刘自发, 张伟, 王泽黎. 基于量子粒子群优化算法的城市电动汽车充电站优化布局[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(22): 39-45+20.  
LIU Zifa, ZHANG Wei, WANG Zeli. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on quantum PSO algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(22): 39-45+20.
- [15] 段豪翔, 吕林, 向月. 计及分时充电电价激励的电动汽车充电站与配电网协同规划[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(1): 103-110.  
DUAN Haoxiang, LÜ Lin, XIANG Yue. Coordinated planning for electric vehicle charging station and distribution network considering time-of-use charging price[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(1): 103-110.
- [16] 王桂哲. 电动汽车有序充电与配电网成本效能分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.  
WANG Guizhe. Orderly charging of electric vehicles and cost-efficiency analysis of distribution network[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [17] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充放电策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(15): 127-134.  
YAN Jun, YAN Feng. An orderly charging and discharging strategy for residential electric vehicles based on peak-valley electricity tariffs[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(15): 127-134.
- [18] 陈鹏. 电动汽车接入配电网的规划研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2017.  
CHEN Peng. Stud on planning of electric vehicle access distribution network[D]. Beijing: North China University of Technology, 2017.
- [19] 杨旭华, 王万良, 孙优贤. 一种基于幂级数展开和最小二乘法的高速公路稳态速度—密度平衡关系式的辨识算法[J]. *公路交通科技*, 2006, 23(2): 120-122.  
YANG Xuhua, WANG Wanliang, SUN Youxian. Identification algorithm of expressway steady-state speed-density equilibrium relational expression[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23(2): 120-122.
- [20] 茹红蕾. 城市道路通行能力的影响因素研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
RU Honglei. Research on influence factors of urban road capacity[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [21] 胡盼. 基于人均行驶速度的路段交通拥堵指数算法[J]. *交通科技*, 2016(4): 127-129.  
HU Pan. Traffic congestion index calculation method based on per capita travel speed of road sections[J]. *Transportation Science & Technology*, 2016(4): 127-129.
- [22] 郑淑鉴, 杨敬锋. 国内外交通拥堵评价指标计算方法研究[J]. *公路与汽运*, 2014(1): 57-61.  
ZHENG Shujian, YANG Jingfeng. Research on calculation method of traffic congestion evaluation index at home and abroad[J]. *Highways & Automotive Applications*, 2014(1): 57-61.
- [23] 何建中. 城市地区私人小汽车出行成本构成理论及其量化评估方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.  
HE Jianzhong. The constitution theory and quantitative evaluation method of trip cost about private car in urban areas[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [24] NICK M, CHERKAoui R, PAOLONE M. Optimal Allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(5): 2300-2310.
- [25] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑车流信息与配电网容量约束的充电站规划[J]. *电网技术*, 2013, 37(3): 582-589.  
GE Shaoyun, FENG Liang, LIU Hong, et al. Planning of charging stations considering traffic flow and capacity constraints of distribution network[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(3): 582-589.
- [26] 李含玉, 杜兆斌, 陈丽丹, 等. 基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及V2G评估[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(21): 88-102.  
LI Hanyu, DU Zhaobin, CHEN Lidan, et al. Charging load forecasting model and vehicle-to-grid evaluation of electric vehicles based trip simulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(21): 88-102.
- [27] 赵静琦, 姬亚芹, 李越洋, 等. 天津市道路车流量特征分析[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(3): 399-405.  
ZHAO Jingqi, JI Yaqin, LI Yueyang, et al. Distribution characteristics of traffic volume for typical roads in Tianjin city[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(3): 399-405.
- [28] 齐智辈. 基于交通流数据的城市交通拥堵检测方案研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.  
QI Zhibei. Study of urban traffic congestion detection scheme based on traffic flow data[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2017.