

文章编号:1671-6833(2023)02-0082-09

考虑用户动态充电需求的电动汽车充电站规划

朱永胜¹, 杨振涛¹, 丁同奎², 徐其迎¹, 巫付专¹, 聂彩静¹

(1. 中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007; 2. 国网郑州供电公司, 河南 郑州 450052)

摘要:为提高电动汽车(EV)充电站规划布局的合理性,避免出现投资高、效率低的局面,提出一种考虑用户动态充电需求的电动汽车充电站规划方法。首先,利用出行链理论和起止点(OD)矩阵得到用户出行起讫点,构建交通拥堵状况随时间变化的动态交通路网模型,并改进 Dijkstra 算法规划 EV 行驶路径,考虑环境温度和车速实时变化对单位里程功耗的影响,建立考虑用户动态充电需求的充电站选择模型;其次,采用 M/M/c 排队论方法对充电站进行容量配置,以充电站建设运维成本和 EV 用户经济损失(包括时间损失和电量损耗)之和最小为目标函数,建立充电站规划模型;最后,以某市主城区部分实际道路情况为规划区域,通过迭代排列寻优并结合粒子群算法对模型求解。结果表明:区域内规划的6座充电站位置分布均匀,减少了用户充电路途成本,且充电桩最优配置数在保证充电满意度的同时使充电站总经济成本最低,所提规划方法合理有效。

关键词:电动汽车;交通路网;Dijkstra 算法;动态充电需求;容量配置;充电站

中图分类号: TM715

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2023.02.001

具有高效、清洁、环保等优点的电动汽车(electric vehicle, EV)在推进绿色低碳发展、二氧化碳排放尽早达峰等方面发挥了重要作用,近年来其保有量迅速增长^[1]。2021年中国电动汽车数量达到794万辆,充电桩保有量为261.7万台,但实际公共充电桩数仅有114.7万台,远未实现“车桩1:1”预设目标^[2],预计未来需建设更多的充电站来满足EV用户的充电需求。在此背景下,EV充电站的合理规划建设显得尤为重要。

充电站作为一种为用户提供充电服务的公共设施, EV 充电负荷的时空分布直接影响其建设位置和容量配置。从国内外学者的相关研究来看, EV 充电负荷时空分布受交通状况^[3]、环境温度^[4]、用户出行特性^[5]以及里程焦虑^[6]等多种因素的影响。赵书强等^[7]基于出行链理论来模拟用户出行规律,通过蒙特卡洛方法对电动汽车充电负荷进行预测。宋雨浓等^[8]考虑道路红绿灯位置影响建立一种按步长仿真的车辆时空转移模型。张美霞等^[9]考虑多源信息实时交互,构建基于后悔理论的充电站选择模型得到充电站充电负荷信息。

充电站规划问题涉及充电站经营者^[10]、EV 用

户^[11]和配电网^[12]等多个相关利益主体。藏海祥等^[13]在多种场景下对 EV 用户充电需求进行预测,建立综合考虑用户侧与非用户侧双方利益的多目标规划模型。陈静鹏等^[14]基于用户出行需求,构建以 EV 用户空驶成本最小为目标的选址定容规划模型。但是现有研究对 EV 充电负荷的时空分布特性以及充电站规划问题的研究仍存在以下局限。

(1)上述文献虽然考虑了交通路网约束,但是对交通拥堵的时变特性分析不足,亦弱化了车速和环境温度的实时变化对单位里程耗电量的影响。

(2)以往的研究大多先预测出 EV 充电负荷的时空分布,在充电站规划时假设用户就近选择充电站进行充电,并没有具体分析不同 EV 用户的动态充电需求,得到的充电站充电负荷信息会有误差。

(3)目前在充电站规划时考虑 EV 用户充电满意度的研究尚不完善,用户充电满意度主要由前往充电站的时间损失、电量损耗及站内排队时间决定。

针对以上分析,本文提出一种考虑用户动态充电需求的电动汽车充电站规划方法。首先基于 EV 用户出行特性、实时交通信息、环境温度以及里程焦虑等因素,通过改进 Dijkstra 算法模拟 EV 出行过

收稿日期:2022-07-12;修订日期:2022-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61873292);河南省高等学校重点科研项目(22ZX011)

作者简介:朱永胜(1980—),男,河南郑州人,中原工学院副教授,博士,主要从事新能源系统优化运行与调度研究, E-mail: zhuysdy@163.com。

引用本文:朱永胜,杨振涛,丁同奎,等.考虑用户动态充电需求的电动汽车充电站规划[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(2):82-90.(ZHU Y S, YANG Z T, DING T K, et al. Electric vehicle charging station planning considering users' dynamic charging demand[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2): 82-90.)

程,建立考虑用户动态充电需求的充电站选择模型;然后,采用 M/M/c 排队论方法对充电站进行容量配置,建立以充电站建设运维成本和 EV 用户经济损失之和最小为目标的充电站规划模型;最后,以某市主城区部分实际道路情况为规划区域验证本文所提方法的有效性与合理性。

1 电动汽车用户出行特性

1.1 基于出行链方式的私家车出行特征

出行链可以很好地模拟电动私家车的出行过程,出行链就是围绕人的所有出行活动构成一个完整的出行链条,从起始点出发,在一定时间顺序上依次经过若干目的地,最后到达终点,结束全部出行的过程^[7]。本文以家作为私家车用户的起点和终点,所构成的3种出行链如图1所示,假设3种出行链的概率分别为52.8%、24.1%、23.1%^[14]。

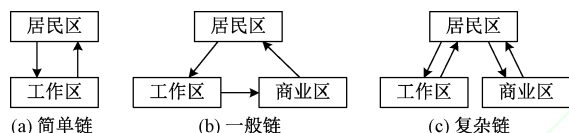


图1 典型出行链结构

Figure 1 Typical travel chain structure

根据美国交通部居民出行数据统计结果^[14],私家车用户第一次出行时刻和下班时刻均服从正态分布^[7],在商业区的停留时间服从广义极值分布^[7]。

1.2 基于出行概率矩阵的出租车出行特征

当前出租车的运营模式主要实行轮班制,车辆由多名司机轮班驾驶运营。出租车在早上6点换班时间的出行概率最大,其目的地由乘客决定,具有很强的不确定性和随机性,采用 OD (origin-destination) 分析法来描述出租车的出行特征。OD 分析是一种广泛应用于道路规划和交通仿真的方法,通过调查统计可以确定出租车出行起讫点分布规律,从各时段城市路网节点的 OD 概率矩阵得到电动出租车的出行目的地^[6]。

2 动态交通路网

2.1 静态交通路网

根据图论的原理来描述交通路网拓扑结构特征,图 $G=(V, E)$ 表示路网的拓扑结构图, V 为路网中所有节点的集合 $\{1, 2, \dots, n\}$, 即道路的起止点或交叉口; E 为路网中所有路段的集合。在图2交通路网拓扑结构中,道路都为双向道,采用道路长度对交通路网图量化赋值,其静态交通路网拓扑结构可

由式(1)矩阵 D 表示。

$$D = \begin{bmatrix} 0 & l_{12} & l_{13} & \cdots & l_{1N} \\ l_{21} & 0 & l_{23} & \cdots & l_{2N} \\ l_{31} & l_{32} & 0 & \cdots & l_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{N1} & l_{N2} & l_{N3} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N 为交通路网中道路节点总数量; l_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, N$ 且 $i \neq j$) 为路网中直连道路 ij 的长度,当两节点没有道路直接连通时, l_{ij} 的取值为 inf 。矩阵 D 中的元素值由道路长度构成,不随时间变化,故称之为静态交通路网。

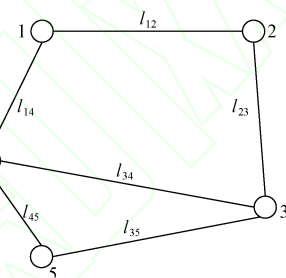


图2 交通路网拓扑结构

Figure 2 Road network topology matrix

2.2 动态交通路网架构

交通路网中道路在不同时刻的拥堵情况完全不同,不同道路等级的 EV 平均行驶速度可由式(2)计算:

$$\begin{cases} V_{ij}(t) = \frac{V_{ij\max}}{1 + \left(\frac{q_{ij}(t)}{C_{ij}}\right)^\beta}; \\ \beta = b + c \cdot \left(\frac{q_{ij}(t)}{C_{ij}}\right)^n. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $V_{ij\max}$ 为路段 ij 的零流速度; $q_{ij}(t)$ 为 t 时刻路段 ij 的车流量; C_{ij} 为道路 ij 的最大通行能力,与道路等级成正比; $q_{ij}(t)$ 与 C_{ij} 的比值为 t 时刻路段饱和度; β 为经验系数;不同等级道路的相关系数 b, c, n 的取值参考文献[6]。

由式(2)可知 t 时刻车辆在道路 ij 上的通行耗时可表示为

$$T_{ij}(t) = l_{ij} V_{ij}(t)^{-1}. \quad (3)$$

把静态交通路网模型中矩阵 D 的元素 l_{ij} 替换为 $l_{ij} V_{ij}(t)^{-1}$, 形成新的矩阵 D_t , 可间接反映时段 t 车辆在交通路网中任一条道路上的通行耗时, D_t 即为考虑道路等级和实时车流量的动态交通路网模型,如式(4)所示。

$$D_t = \begin{bmatrix} 0 & l_{12}V_{12}(t)^{-1} & l_{13}V_{13}(t)^{-1} & \cdots & l_{1N}V_{1N}(t)^{-1} \\ l_{21}V_{21}(t)^{-1} & 0 & l_{23}V_{23}(t)^{-1} & \cdots & l_{2N}V_{2N}(t)^{-1} \\ l_{31}V_{31}(t)^{-1} & l_{32}V_{32}(t)^{-1} & 0 & \cdots & l_{3N}V_{3N}(t)^{-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{N1}V_{N1}(t)^{-1} & l_{N2}V_{N2}(t)^{-1} & l_{N3}V_{N3}(t)^{-1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3 充电站需求模型

3.1 最短耗时出行路径规划

利用蒙特卡洛方法为 EV 用户抽取起讫点后,从起始点有多种行驶路径可以到达目的地,通常情况下 EV 用户会选择耗时最短的出行路线。传统的 Dijkstra 算法常用于解决网络图论模型的最短路径规划问题,基本思想是利用静态交通路网矩阵 D ,以式(5)为目标函数,在所有可能的 R 中求出令 L 值最小的行驶路线^[8]:

$$L = \sum_{(i,j) \in R} l_{ij} \quad (5)$$

式中: R 表示路径所含道路集合; L 为路径 R 的总长度。

在传统 Dijkstra 算法思想的基础上,结合不同时刻的动态交通路网矩阵 D_t ,以式(6)中 L' 值最小为目标,求得最短耗时出行路径:

$$L' = \sum_{(i,j) \in R} l_{ij} V_{ij}(t)^{-1} \quad (6)$$

3.2 实时单位里程功耗

(1) 交通-能耗关系。交通拥堵在影响车辆行驶速度的同时会导致车辆频繁地制动和启动,从而增加耗电量。基于实时交通拥堵情况建立单位里程耗电量模型^[8],单位里程耗电量可由式(7)计算:

$$\omega_{l,ij}^t = \sum_{n=-1}^2 a_n (V_{ij}(t))^n \quad (7)$$

式中: $\omega_{l,ij}^t$ 为不同道路等级下的单位里程耗电量; a_n 为不同道路等级的交通能耗系数^[8]。

(2) 温度-能耗关系。环境温度的变化会对电池的性能产生影响,空调系统的使用也会产生额外耗电量。本文引入式(8)来表示车辆单位里程耗电量与环境温度之间的函数关系^[8]:

$$\omega_T = \sum_{n=0}^5 b_n (1.8T + 32)^n \quad (8)$$

式中: T 为环境温度; ω_T 为不同环境温度下的单位里程耗电量; b_n 为温度能耗系数^[8]。

(3) 综合能耗。由温度-能耗关系可知,在 20 ℃ 时车辆的单位里程耗电量最小,以 ω_{20} 为基准,定义温度 T 时耗电量比 k_T 为

$$k_T = \frac{\omega_T}{\omega_{20}} \quad (9)$$

$$\omega_{ij}^t = k_T \omega_{l,ij}^t \quad (10)$$

综合考虑交通和温度的影响,实时单位里程耗电量可以用式(10)计算。

3.3 动态充电需求判断

车辆 t 时刻剩余电量 Cap_t 可由式(11)计算:

$$Cap_t = Cap_{t-1} - \sum_{(i,j) \in R} l_{ij} \omega_{ij}^{t-1} \quad (11)$$

式中: ω_{ij}^{t-1} 为 $t-1$ 时刻路段 ij 的实时单位里程耗电量。当 t 时刻电动汽车电量满足以下特征时,产生充电需求。

(1) 对私家车来说,出行链结构比较固定,当车辆开始下一段行程前,判断当前电量是否满足出行所需电量。

$$Cap_t \leq Cap_{ij} \quad (12)$$

式中: Cap_{ij} 为下一次出行所需电量。

(2) 对于出租车,停车时间较短,考虑到出租车司机的里程焦虑不同,设置 SOC 阈值服从 $[0.15, 0.30]$ 均匀分布。

$$Cap_t \leq Cap_c \quad (13)$$

式中: Cap_c 为用户充电阈值电量。

3.4 考虑用户动态需求的充电站选择模型

当用户产生充电需求时,先分析 EV 用户动态充电需求信息,由改进的 Dijkstra 算法计算从充电需求点前往充电站 j 和充电完成后前往目的地的行程时间之和,充电站选择模型可表示为

$$F_{Tj} = \left(\sum_{h_1 \in R_1} \Delta T_{h_1} + \sum_{h_2 \in R_2} \Delta T_{h_2} \right) \quad (14)$$

式中: F_{Tj} 为选择充电站 j 时的综合行程时间; R_1 和 R_2 分别为用户从充电需求点前往充电站和补电之后前往目的地的最短耗时路径集合。EV 用户会选择综合行程时间最短的充电站,充电站需求模型框架如图 3 所示。

4 充电站规划策略

4.1 目标函数

建设 EV 充电站时不仅要考虑充电站经营者的投资成本,同时要兼顾提供充电服务过程中的用户满意度^[2]。本文考虑充电站经营者与 EV 用户双方利益具有同等重要性,建立充电站选址定容优化模型,以充电站年化总经济成本最低为目标函数,如式(15)所示:

$$F = F_1 + F_2 \quad (15)$$

式中: F 为充电站年化总经济成本; F_1 为充电站年

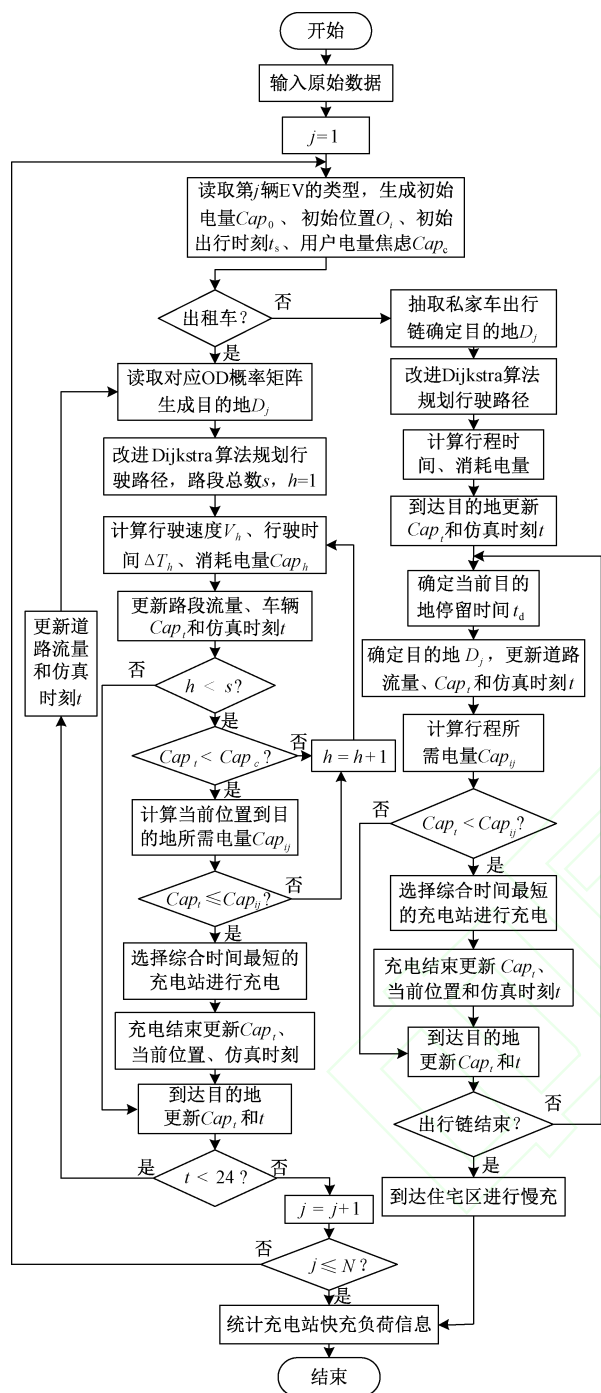


图3 充电站需求模型流程图

Figure 3 Flow chart of charging station demand model

建设运维成本; F_2 为用户年化经济损失。

(1) 充电站年建设运维成本。充电站的年建设运维成本包括年建设成本和年运维成本, 计算公式为

$$F_1 = \sum_{j=1}^M \left[\frac{r_0(1+r_0)^{y_s}}{(1+r_0)^{y_s} - 1} f(N_{\text{chj}}) \right] + \sum_{j=1}^M C_{y_j}; \quad (16)$$

$$f(N_{\text{chj}}) = C_j + qN_{\text{chj}} \quad (17)$$

式中: M 为充电站数量; N_{chj} 为充电站 j 内充电桩的数量; r_0 为充电站平均折旧率; y_s 为充电站最高使

用年限; $f(N_{\text{chj}})$ 为充电站建设成本函数; C_j 为第 j 个充电站的固定投资成本; q 为单个充电桩购买及土地租金等相关费用。

C_{y_j} 为第 j 个充电站的年运维成本, 充电站的运维成本与日运行容量成正比^[2], 充电站的年运维成本为

$$C_{y_j} = (k_1 + k_2) Cap_{\text{rpi}} T_y \quad (18)$$

式中: k_1 为员工工资比例系数; k_2 为并网成本比例系数; Cap_{rpi} 为第 j 个充电站日运行容量。

(2) 用户年化经济损失。综合考虑用户前往充电站的路途耗时、站内排队时间和充电路途电量损耗, 用式(19)计算用户年化经济损失:

$$F_2 = T_y \sum_{j=1}^M (C_{w_j} + C_{m_j} + C_{\text{cej}}) \quad (19)$$

式中: C_{w_j} 为 EV 用户从充电需求点前往第 j 个充电站的路途时间成本; C_{m_j} 表示第 j 个充电站内的用户排队时间成本; C_{cej} 为用户从充电需求点行驶至第 j 个充电站的电量损耗成本。其中:

$$C_{w_j} = C_{\text{uat}} \sum_{i \in J_{\text{csj}}} \Delta T_{ij} \quad (20)$$

式中: C_{uat} 为用户的单位时间等效经济损失; J_{csj} 为选择到第 j 个充电站充电的充电需求点集合。

本文基于 M/M/c 排队论方法来计算车主排队等待时间。假设车辆到达充电站的过程服从泊松分布^[15], 以每小时在充电站接受服务的充电车辆作为参数 λ , 则用户平均等待时间 W_q 为

$$W_q = \frac{(N_{\text{chj}}p)^{N_{\text{chj}}}}{N_{\text{chj}}! (1-p)^2 \lambda} P_0; \quad (21)$$

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{N_{\text{chj}}-1} \frac{(\lambda/\mu)^k}{k!} + \frac{(\lambda/\mu)^{N_{\text{chj}}}}{N_{\text{chj}}! (1-p)} \right]^{-1}; \quad (22)$$

$$p = \frac{\lambda}{c\mu} \quad (23)$$

式中: p 为充电桩服务强度; μ 为每个充电桩 1 h 能完成充电服务的车辆数。在第 j 个充电站接受充电服务的 EV 用户排队时间成本 C_{m_j} 可表示为

$$C_{m_j} = C_{\text{uat}} \sum_{k=1}^{24} W_{qk} \lambda_k \quad (24)$$

式中: W_{qk} 为 k 时刻充电站 j 内的平均排队时间; λ_k 为充电站 j 内 k 时刻的充电车辆数。

用户前往第 j 个充电站产生的路途电量损耗成本 C_{cej} 为

$$C_{\text{cej}} = C_{jg} \sum_{i \in J_{\text{csj}}} Cap_{ij} \quad (25)$$

式中: C_{jg} 为用户充电单价; Cap_{ij} 表示从充电需求点到第 j 个充电站所耗费的电量。

4.2 充电站容量配置

以充电站的系统单位总费用(系统服务成本与等待成本之和)最小为目标,建立充电站容量配置优化模型:

$$\min F(N_{chj}) = C_s N_{chj} + C_{uat} L_s; \tag{26}$$

$$L_s = \frac{(N_{chj} p)^{N_{chj}} p}{N_{chj}! (1 - p)^2 p_0} + \frac{\lambda}{\mu}. \tag{27}$$

式中: C_s 为单位时间内每个充电桩的使用成本; L_s 为单位时间的平均队长; $p < 1$ 是式(27)成立的必要条件。

4.3 约束条件

(1) 充电桩配置约束。

$$N_{chmin} \leq N_{chj} \leq N_{chmax}. \tag{28}$$

式中: N_{chmin} 、 N_{chmax} 分别为充电站内充电桩最小和最大配置数量。

(2) 排队等待时间约束。

$$W_q \leq W_{max}. \tag{29}$$

式中: W_{max} 为排队等待时间的最大值。

(3) 充电站覆盖强度约束。为了避免用户前往充电站行驶的距离过长和充电站分布过于集中,相邻 2 个充电站之间的距离 $L_{j,j+1}$ 应不大于充电站服务半径的 2 倍^[15]。

$$R_s \leq L_{j,j+1} \leq 2R_s. \tag{30}$$

式中: R_s 为充电站的服务范围; $L_{j,j+1}$ 为节点 j 和节点 $j + 1$ 之间的实际距离。

4.4 求解流程

在求解过程中,首先,依据建设充电站数量 M ,列出候选充电站站址组合,筛选出满足式(30)约束的候选站址组合,利用蒙特卡洛方法通过充电站需求模型动态模拟,得到候选站址组合的充电站快充需求信息;其次,基于排队论方法,采用粒子群算法以式(26)值最小为目标对充电站进行容量配置,过程须满足式(28)和式(29)的约束条件;最后,根据式(15)~(25)计算各充电站候选站址组合年化总经济成本 F ,求得该模型充电站站址组合及容量的最优规划。

5 算例分析

5.1 参数设置

以图 4 所示某城区部分主要道路为规划区域,该区域共分为居民区、商业区和工业区,包含 29 个道路节点和 49 条道路,各道路参数见文献[7]。本文假设该区域中共有 8 000 辆电动私家车,2 000 辆电动出租车,算例所用的电动出租车电池额定容量

60 kWh,私家车电池额定容量 24 kWh。初始出行时电池荷电状态服从正态分布 $(0.6, 0.1^2)$,充电站充电功率为 60 kW,充电效率为 0.9,充电站选址定容模型相关参数设置如表 1 所示。

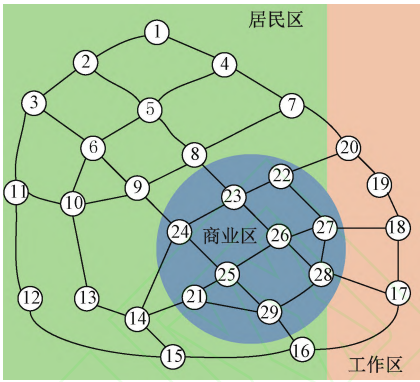


图 4 规划区域部分主干道示意图

Figure 4 Schematic diagram of main road in planning area

表 1 充电站选址定容参数

Table 1 Charging station location and capacity parameters

参数	取值	参数	取值
$r_0/\%$	8	y_s/a	20
$C_j/\text{万元}$	100	$q/\text{万元}$	11
k_1	0.01	k_2	0.071
T_y	365	$C_{uat}/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	21.44
μ	2	$C_{jg}/(\text{元} \cdot (\text{kwh})^{-1})$	1.8
W_q/min	12	$C_s/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	5.07
N_{chmin}	15	N_{chmax}	45

5.2 规划结果及分析

规划区域充电站建设数量设置为 5~8 座,对应充电站综合年化经济成本如表 2 所示。

从表 2 可以看出,随着充电站建设数量的增多,充电站年建设成本呈增加趋势,因为充电站建设数量增多,导致充电站的固定投资成本、充电桩的购买和安装成本都相应增加。充电站年运维成本相近,因为区域内车辆数固定,充电站日运行容量变化不大。充电路途耗时成本、耗电成本和排队时间成本呈减小趋势,是因为更多的充电站投入使用,增加了用户充电的便利度,减少 EV 用户前往充电站的行驶时间、损耗电量和排队时间,同时提升了用户充电满意度。当规划区域建设 6 座充电站时,充电站综合年化总经济成本最低,为 598.13 万元。

5.3 最优充电站位置和容量

给建设的 6 座充电站编号为 CS1~CS6,最优充电站建设位置、充电桩配置数如表 3 所示。从表 3 结合图 4 可以看出,充电站位置分布均匀,站间距离合适,能很好地为整个区域提供快充服务。图 5 为快充需求时空分布图,从图 5 看出,快充需求数在

表 2 充电站综合年化经济成本

Table 2 Comprehensive annualized economic cost of charging stations

充电站 数量/座	充电站年建 设成本/万元	充电站年运 维成本/万元	年充电路途耗 时成本/万元	年排队时间 成本/万元	年充电路途耗 电成本/万元	年化总经济 成本/万元
5	223.74	98.38	123.50	74.45	93.31	613.38
6	237.13	97.39	109.85	69.53	84.23	598.13
7	259.20	99.36	105.88	66.08	80.11	610.63
8	290.91	98.53	94.36	60.45	71.90	616.15

14:00~15:00 出现第一个峰值,快充点分布比较均匀,主要因为出租车在经历一上午的寻客和载客后电量不足;在 20:00~21:00 出现另一个峰值,快充需求点集中在从工作区和商业区回居民区的道路节点,私家车用户下班或经历商业活动之后电量不满足下段行程所需电量,因此产生快充需求。

表 3 最优站址组合规划结果

Table 3 Optimal site combination planning results

充电站编号	道路节点	充电桩数量
CS1	7	19
CS2	10	27
CS3	14	33
CS4	18	36
CS5	23	22
CS6	29	21

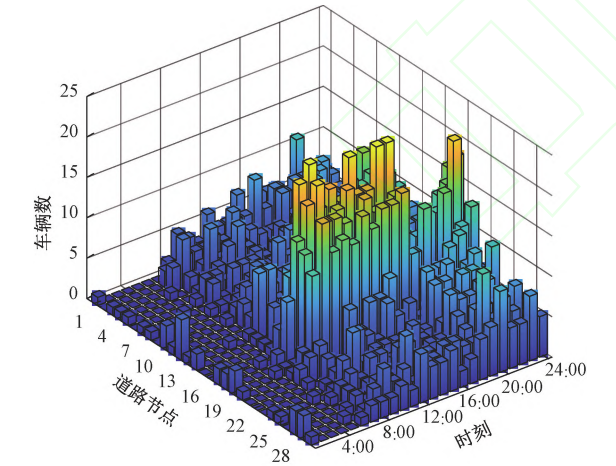


图 5 快充需求时空分布

Figure 5 Space-time distribution of fast charging demand

图 6 为充电站 CS1~CS6 一天的充电车辆数分布图,从图 6 中看出,选择在充电站 CS2、CS3、CS4 进行补电的车辆数较多,因为充电需求点大多分布在从商业区和工作区返回居民区的路上,EV 用户选择综合行程时间最短的充电站,这些充电站位于居民区和工作区的重要道路节点,也是出租车接送客路线和私家车回居民区路线主要经过节点。图 7 为充电站快充负荷分布图,从图 7 可以看出,充电负荷的分布特性和 EV 用户充电行为相一致,充电站

CS2、CS3、CS4 服务的车辆数量较多。从图 8 充电站综合年化经济成本中看出,充电站的年排队等待时间成本并不高,因为这些充电站有更多的充电桩,减少用户排队时间,在一定程度上反映了充电站容量配置方法的合理性。充电站的建设运维成本、EV 用户的路途耗时和电量损耗成本均与充电站容量及服务车辆数呈正相关,证明了本文提出的充电站选址定容模型的合理性。

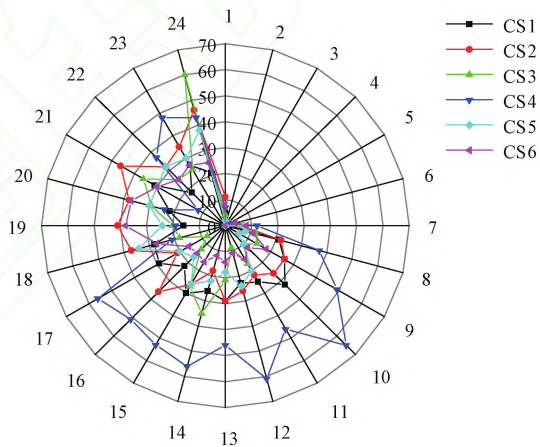


图 6 充电车辆数

Figure 6 Number of charging electric vehicles

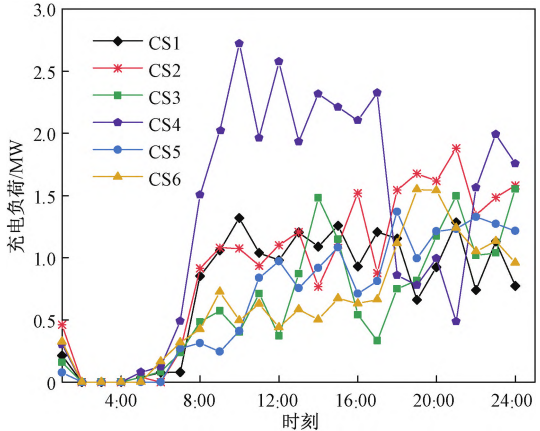


图 7 充电站快充负荷

Figure 7 Fast charging at charging station

5.4 充电站选择行为对比结果分析

为了分析用户选择充电站行为对规划结果的影响,设置如下方案。

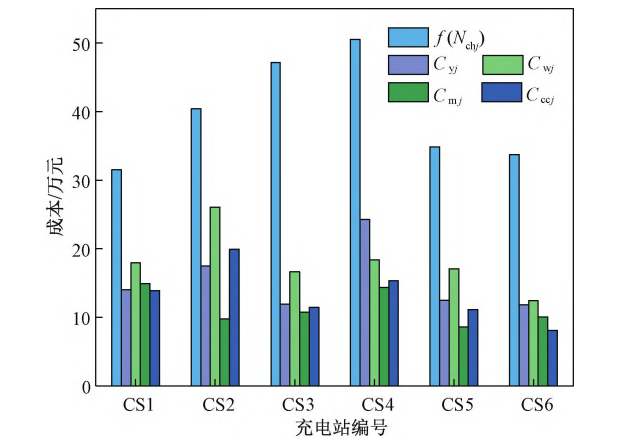


图 8 充电站综合年化经济成本

Figure 8 Annualized economic cost of charging station

方案 1:采用本文所提充电站选择方法。

方案 2:用户在选择充电站时只考虑距离因素。

以建设 6 个充电站为例,规划对比结果如表 4 所示,从表 4 可以看出,方案 2 中充电站主要分布在各功能区车流量较大的道路节点,附近的充电需求车辆较多,用户在选择充电站时只考虑距离因素,同一时段充电车辆前往同一充电站的几率增加。充电站建设道路节点 18 和 22 位于工作区和商业区,EV 用户出行活动频率较高,产生的快充需求车辆数也随之增多,充电站内充电桩配置也相对较多。

方案 2 中充电站年建设成本相比方案 1 增加 9.96 万元,因为总充电桩数量增多,虽然 EV 用户年排队时间成本减少 4.12 万元,但用户年路途耗时和

表 4 不同方案规划结果

方案	最优充电站 选址	最优充电 桩数量	充电站综合年化成本/万元					用户补电后年 路途成本/万元
			$f(N_{chj})$	C_{yj}	C_{wj}	C_{mj}	C_{ccj}	
1	7,10,14,18,23,29	19,27,33,36,22,21	237.13	97.39	109.85	69.53	84.23	598.13
2	5,13,16,18,21,22	26,19,17,39,22,43	247.09	96.11	115.11	65.41	87.16	610.88

路途电量损耗成本相比方案 1 都增加了,用户选择距离最近的充电站,没有考虑路段交通拥堵的影响,前往充电站路程花费的时间和损耗电量不一定就少。用户在充电站补电后前往目的地的年路途成本为 164.77 万元,对比方案 1 增加 89.56 万元,充电站年化总经济成本 F 也比方案 1 高,证明本文提出的选择综合行程时间最短的充电站方法的优势,使 EV 用户规避交通拥堵路段,以最短的行程时间到达目的地,减少了用户的时间和电量损失成本。

5.5 不同规划目标结果分析

为了分析充电站投资成本和用户经济损失对规划结果的影响,以建设 6 个充电站为例,表 5 展示了 12 个典型充电站候选站址组合规划结果。图 9 为典型组合综合年化经济成本图。

由表 5 可知,在充电站规划时只考虑 EV 用户利益时方案 11 为最优解,用户年经济损失成本为 249.910 万元,充电站年建设运维成本为 353.339 万元。单独考虑充电站投资方利益时方案 8 为最优解,充电站年建设运维成本为 327.593 万元,用户年经济损失成本为 323.162 万元。

本文提出的考虑充电站经营者和 EV 用户双方利益具有同等重要性,结合表 5 和图 9 可知,方案 6 是本文所提模型的最优解方案,方案 6 的充电站建设成本、用户前往充电站的时间和电量损失成本、排队时间成本相比其他方案都不是最低的,但是该方

表 5 典型站址组合规划结果

Table 5 Typical site combination planning results				
组合	充电站 选址	充电桩 数量	F_1 /万元	F_2 /万元
1	5,13,16,	34,31,16,	328.491	272.314
	17,21,22	33,22,28		
2	5,13,17,	22,36,25,	347.070	259.737
	20,24,26	34,23,31		
3	6,7,13,	36,22,27,	356.872	253.949
	16,18,26	16,38,39		
4	6,13,16,	39,22,16,	341.041	262.113
	18,21,22	38,17,28		
5	7,9,13,	22,35,27,	338.343	285.507
	17,22,25	36,17,26		
6	7,10,14,	19,27,33,	334.520	263.610
	18,23,29	36,22,21		
7	7,13,16,	31,30,16,	346.436	283.022
	18,24,26	35,27,30		
8	7,9,13,	34,31,24,	327.593	323.162
	16,21,22	19,19,26		
9	8,13,16,	39,37,16,	352.927	302.233
	20,21,28	39,18,26		
10	9,13,16,	34,27,16,	342.488	308.296
	20,21,28	39,20,30		
11	10,14,16,	36,33,16,	353.339	249.910
	17,20,26	28,31,28		
12	13,16,17,	28,17,29,	351.747	274.039
	20,24,26	35,31,34		

案综合年化总经济成本 F 为 598.13 万元,是各方案中最具有优势的,证明本文所提模型的优势性,充分保障了充电站经营者与 EV 用户双方利益。

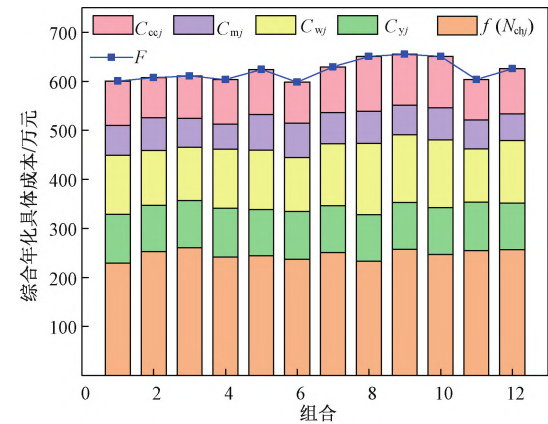


图 9 典型组合综合年化经济成本

Figure 9 Typical portfolios combine annualized economic costs

6 结论

本文提出考虑用户动态充电需求的电动汽车充电站规划方法,并以某市主城区部分实际道路情况为规划区域进行仿真分析,得出以下主要结论。

(1)建立考虑用户动态充电需求的充电站选择模型分析用户实际充电需求信息,EV 用户选择综合行程时间最短的充电站,规避拥堵路段,在充电完成后快速前往目的地,减少 EV 用户经济损失。

(2)以充电站年化总经济成本最低为优化目标,充电站建设运维成本和 EV 用户经济损失成本之和较低,规划的充电站建设位置和充电桩数量配置比较合理,符合实际情况,充分保障了双方利益,证明了本文所提模型的合理性和可行性。

参考文献:

[1] SUN S Y, YANG Q, YAN W J. Optimal temporal-spatial PEV charging scheduling in active power distribution networks[EB/OL]. (2017-09-19) [2022-03-17]. <https://doi.org/10.1186/541601-017-0065-x>.

[2] 严干贵,刘华南,韩凝晖,等. 计及电动汽车时空分布状态的充电站选址定容优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6271-6284.

YAN G G, LIU H N, HAN N H, et al. An optimization method for location and capacity determination of charging stations considering spatial and temporal distribution of electric vehicles[J]. Proceedings of the Csee, 2021, 41(18): 6271-6284.

[3] 李晓辉,李磊,刘伟东,等. 基于动态交通信息的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统保护与

控制, 2020, 48(1): 117-125.

LI X H, LI L, LIU W D, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicles based on dynamic traffic information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 117-125.

[4] YAN J, ZHANG J, LIU Y Q, et al. EV charging load simulation and forecasting considering traffic jam and weather to support the integration of renewables and EVs[J]. Renewable Energy, 2020, 159: 623-641.

[5] 张琳娟,许长清,王利利,等. 基于 OD 矩阵的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 82-91.

ZHANG L J, XU C Q, WANG L L, et al. OD matrix based spatiotemporal distribution of EV charging load prediction[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 82-91.

[6] 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 Y C, MU Y F, YU X D, 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.

[7] 赵书强,周靖仁,李志伟,等. 基于出行链理论的电动汽车充电需求分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 105-112.

ZHAO S Q, ZHOU J R, LI Z W, et al. EV charging demand analysis based on trip chain theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 105-112.

[8] 宋雨浓,林舜江,唐智强,等. 基于动态车流的电动汽车充电负荷时空分布概率建模[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 47-56.

SONG Y N, LIN S J, TANG Z Q, et al. Spatial-temporal distribution probabilistic modeling of electric vehicle charging load based on dynamic traffic flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 47-56.

[9] 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 M X, SUN Q J, YANG X. 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.

[10] LIU Y B, XIANG Y, TAN Y Y, et al. Optimal allocation model for EV charging stations coordinating investor and user benefits[J]. IEEE Access, 2018, 6: 36039-36049.

[11] SADEGHI-BARZANI P, RAJABI-GHAHNAVIEH A,

KAZEMI-KAREGAR H. Optimal fast charging station placing and sizing[J]. *Applied Energy*, 2014, 125: 289-299.

[12] 张忠会, 刘故帅, 熊剑峰, 等. 基于谱聚类算法的城市充换电站分布决策[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2017, 38(5): 32-38.

ZHANG Z H, LIU G S, XIONG J F, et al. The application of spectral clustering algorithm to distributive decision for charging and battery swap station[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2017, 38(5): 32-38.

[13] 臧海祥, 舒宇心, 傅雨婷, 等. 考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(5): 67-80.

ZANG H X, SHU Y X, FU Y T, et al. Multi-objective planning of an urban electric vehicle charging station considering multi demand scenarios[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(5): 67-80.

[14] 陈静鹏, 艾芊, 肖斐. 基于用户出行需求的电动汽车充电站规划[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(6): 34-39.

CHEN J P, AI Q, XIAO F. EV charging station planning based on travel demand[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(6): 34-39.

[15] 姜欣, 冯永涛, 熊虎, 等. 基于出行概率矩阵的电动汽车充电站规划[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(增刊1): 272-281.

JIANG X, FENG Y T, XIONG H, et al. Electric vehicle charging station planning based on travel probability matrix[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(S1): 272-281.

Electric Vehicle Charging Station Planning Considering Users’ Dynamic Charging Demand

ZHU Yongsheng¹, YANG Zhentao¹, DING Tongkui², XU Qiyang¹, WU Fuzhuan¹, NIE Caijing¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. Stated Grid Zhengzhou Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to improve the rationality of the planning and layout of electric vehicle (EV) charging stations and avoid the situation of high investment and low efficiency, a planning method of EV charging station that considered users’ dynamic charging demand was proposed. Firstly, the starting and ending points of user were obtained by using the travel theory, start and end point (origin-destination, OD) matrix method; a dynamic traffic road network model with time-varying traffic congestion was constructed. The Dijkstra algorithm was improved to plan the EV travel path, considering the real-time changes of ambient temperature and vehicle speed. Based on the influence of mileage and power consumption, a charging station selection model considering the dynamic charging needs of users was established; then, the M/M/c queuing theory method was used to configure the capacity of charging stations. The cost of construction, operation and maintenance of charging stations and the economic losses of EV users (including the sum of time loss and power loss) was minimized as the objective function, and a charging station planning model was established. Finally, taking the actual road conditions in the main urban area of a city as the planning area, the model was solved by iterative arrangement optimization combined with particle swarm algorithm. The results showed that the locations of the six planned charging stations in the area were evenly distributed, which could reduce the cost of users’ charging journeys. And the optimal configuration number of charging piles could ensure charging satisfaction while minimizing the total economic cost of charging stations. The proposed planning method was reasonable and effective.

Keywords: electric vehicles; traffic network; Dijkstra algorithm; dynamic charging needs; capacity configuration; charging station