

多因素下基于路网拓扑的电动汽车充电路径规划策略

周 箐¹, 龙 华¹, 李 帅¹, 蔡伟平², 梁昌侯¹

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650500;

2. 博世(中国)投资有限公司苏州分公司 集团信息中心(CI), 苏州 215000)

摘 要: 随着电动汽车产业的发展,电动汽车的充电需求也日益增加. 为了满足电动汽车用户充电多样性需求并提高充电设施利用率,本文在考虑出行距离、充电电价以及充电站排队情况等三种影响因素下构建混合整数线性规划模型,提出了一种多因素下基于充电站路网拓扑结构的电动汽车充电路径规划方法,为用户规划充电路径与充电站选择. 首先,该方法在能耗约束的前提下基于 Dijkstra 最短路径算法进行充电引导,为求解多目标最优引入信息熵的概念来确定各参数影响权重. 其次,针对用户充电需求的差异性,提出了三种不同目标下的规划方法以降低用户充电成本. 此外,本文构建了站点随机充电服务排队模型并进行敏感性分析以研究充电站服务能力对充电成本的影响. 以某地区路网为算例进行仿真,结果表明本文提出的方法能够有效降低用户充电出行成本并合理规划出行路径,验证了所提模型的可行性和有效性,对充电选择和站点配置具有一定的决策参考意义.

关键词: 电动汽车; 充电路径; 路网拓扑; 排队模型; 路径规划

中图分类号: TM73; U491 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2024.017002

Electric vehicles charging path planning method based on road network under multi parameters

ZHOU Zheng¹, LONG Hua¹, LI Shuai¹, CAI Wei-Ping², LIANG Chang-Hou¹

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University
of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Suzhou Branch Group Information Center (CI), Bosch (China) Investment Co. Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: With the development of the electric vehicle industry, the charging demand for electric vehicles is also increasing. To meet the diverse charging demand of electric vehicle users and improve the utilization rate of charging facilities, this paper proposes a mixed integer linear programming model considering three influencing parameters: travel distance, charging price and charging station queuing. It then presents a multi-factor electric vehicle charging path planning method based on the topology of road network to plan the charging path and station selection for users. Firstly, we uses Dijkstra algorithm for charging guidance under the premise of energy consumption constraint, and introduces the concept of information entropy to determine the weight of each parameter for solving the multi-objective optimization. Secondly, to address the variability of users' charging demand, three planning methods with different objectives are proposed to reduce users' charging costs. Additionally, this paper constructs a stor-

收稿日期: 2022-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(61761025)

作者简介: 周箐(1998-), 女, 河南平顶山人, 硕士研究生, 研究方向为数据处理与建模仿真. E-mail: ria_zhou.km@foxmail.com

通讯作者: 龙华. E-mail: 1670931890@qq.com

017002-1

chastic charging service queue model and conducts sensitivity analysis to investigate the impact of station service capacity on charging cost. Finally, the proposed method is applied to an actual road network for simulation, the results demonstrate that the proposed method can effectively reduce the users' charging travel cost and reasonably plan the travel path and has certain decision-making significance for charging selection and station configuration.

Keywords: Electric vehicle; Charging path; Road network topology; Queuing model; Path planning

1 引言

随着经济的发展,汽车行业规模逐渐扩大,汽车数量也与之增长,由此带来的一系列社会问题尤其是能源安全与环境污染的压力日益增加^[1]. 自我提出“双碳”目标以来,绿色出行的方式逐渐被人们所重视. 相比于燃油汽车,电动汽车(Electric Vehicle, EV)驾驶用户在路途中往往会对电池能耗产生焦虑,同时电动汽车充电基础设施建设的滞后^[1]与长时间的充电时长也会进一步加深用户焦虑,这就是里程焦虑^[2]问题. 因此在考虑控制荷电状态(State of Charge, SOC)的前提下如何为具有充电需求的电动汽车用户提供充电引导策略尤为重要.

目前关于电动汽车充电引导与控制策略的研究,一方面集中在电动汽车能耗预测与负载平衡下的充电引导调度. 文献[3]针对电动汽车行驶途中的耗电行为构建动态能耗模型,以剩余电量为约束提出一种考虑出行时间、距离与充电费用的充电路径规划策略. 文献[4]分析了电动汽车能耗与出行速度之间的权衡关系. 通过引入图论的思想并改进贝尔曼-福特(Moore-Bellman-Ford)算法,提出了一种以出行时间最优为目标的路径规划方法以解决多目标最短路径问题. 文献[5]提出带有能量缓冲器的能耗模型来解决电动汽车能耗预测过程中存在的不确定性问题,减少出行途中电量耗尽的概率. 文献[6]提出了双阶段电动汽车充电调度优化方法,以降低用户成本并实现负荷均衡. 文献[7]提出一种预测决策(Prognostic Decision Making)的方法并构建层次化模型来解决电动汽车随机最短充电路径问题. 文献[8]提出了一种模糊自适应大邻域搜索算法来解决出行过程中不确定性因素对能耗的影响,并将其应用在电动汽车配送出行的路径引导问题中. 文献[9]提出一种涵盖路网与充电站位置结构的两层约束路径规划方法,研究电动汽车的充电调度策略. 上述研究从整体角度以大规模电动汽车作为研究对象,结合实际交通路网信息进

行电动汽车能耗预测来解决最优路径问题,并未考虑电动汽车个体需求和充电站服务成本对充电引导服务的影响.

另一方面,电动汽车充电站性能配置与服务能力同样会对电动汽车充电引导服务产生影响. 文献[10]构建充电站排队模型,研究其对交通路网均衡与用户路径选择的影响. 文献[11]和文献[12]提出一种混合排队网络(Mixed Queueing Network, MQN)来评估站点模型性能与服务质量,同时研究了站点模型参数对阻塞概率的影响. 文献[13]在考虑充换电及车辆到电网放电的多服务模式,构建电动汽车充换电站排队与盈利模型,并将模型应用于混合整数线性规划问题,以实现利润最大化的目标. 文献[14]以评估充电站服务能力为目标,使用层次分析与广义熵权法获取评价分值并构建多服务排队模型,提出一种结合定性与定量分析的充电站服务能力评价方法. 文献[15]分析了有限长队列下充电站排队行为,以总成本最小化为目标优化充电站的位置与容量配置. 上述文献均侧重于对充电站性能影响的分析与充电设施的优化,忽略了充电费用和充电服务时间对电动汽车充电引导服务策略的影响.

基于上述研究内容,本文建立充电站模型以分析站内配置与服务强度对用户充电选择的影响,并从电动汽车用户个体角度出发,在考虑出行距离、充电电价以及充电设施占用情况三者因素下将电动汽车充电引导服务问题构建为混合整数线性规划模型,以规划目标最小化为目的提供充电出行选择策略,进而减少电动汽车充电出行与充电服务成本.

2 模型建立

电动汽车用户在选择充电站进行充电时,除出行距离与时间外,还需考虑充电站服务成本等因素. 为研究充电站性能配置与服务能力对电动汽车充电引导出行的影响,本文建立了充电站时间成本模型与融合充电成本的路网出行成本模型来模拟

电动汽车充电出行过程. 在分析过程中对模型做出以下假设:

(1) 电动汽车到达充电站的行为受用户日常用车习惯的影响, 具有一定的随机性. 为分析电动汽车的出行特性, 现有研究根据真实数据进行分布规律检验^[16]和数量拟合^[17]得出车辆到达服从泊松分布时准确率较高, 基于此, 本文假设电动汽车到达充电站的过程服从泊松分布, 各个充电站基础服务设施无差别且充电服务效率相同.

(2) 由于等待充电服务时间过长会提高用户焦虑度, 也会导致电动汽车用户的服务质量降低^[13,18], 因此假设电动汽车排队等待时间存在上限. 此外, 本文主要研究电动汽车的充电行为, 不考虑 V2G (Vehicle-to-Grid) 技术下车辆到电网的放电行为所带来的影响.

(3) 电动汽车包括纯电动汽车 (Battery Electric Vehicle, BEV) 和插电式混合动力汽车 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV). 本文研究的电动汽车均为 BEV 类型且蓄电池最大容量相同. 由于大多数电动汽车用户出行时会保持 SOC 值在 60% 以上^[19], 且电池的放电深度为 50% 时可将电池损耗降至最低^[20]. 为延长电池寿命、提高电池使用的合理性, 假设出行过程中当 SOC 值低于 50% 时电动汽车存在充电需求.

2.1 充电站时间成本模型

充电站整体服务模式采取先到先服务模式 (First Input First Output, FIFO). 在电动汽车充电站 u 内, 电动汽车到达使用优先级队列存储, 充电桩数量为 n_u , 充电桩的使用情况用二进制定量 c_u 表示, 充电桩处于空闲状态时 $c_u = 0$, 处于使用状态时 $c_u = 1$. 当 $\sum c_u < n_u$ 时电动汽车进行充电服务; 当 $\sum c_u = n_u$ 时服务台全部占用, 电动汽车加入排队队列进行等待, 且等待时间 W_u 存在最大等待时长上限 W_{\max} . 当 $W_u \leq W_{\max}$ 时电动汽车处于排队等待状态; 反之则为违约状态, 电动汽车离去.

排队过程中等待时间上限表明充电站并非无限排队制模型, 等同于站点内存在最大排队长度即充电站容量的限制. 对于充电站 u , 其最大容量 K_u 为.

$$K_u = n_u + \left\lceil \frac{n_u}{\delta} \right\rceil, n_u \in \mathbb{Z}_0^+ \quad (1)$$

其中, δ 表示充电桩数量与充电站最大排队长度的比值, 即 $\left\lceil \frac{n_u}{\delta} \right\rceil$ 表示当前充电站的最大队列长度. 电

动汽车充电站的服务强度 ρ 定义有

$$\rho = \lambda_u / n_u \mu \quad (2)$$

式(2)中, λ_u 为充电站 u 的平均到达率, μ 为平均服务率; 则 $1/\lambda_u$ 表示车辆到站的平均时间间隔, $1/\mu$ 表示平均充电时间.

根据上述公式结合文献^[15,21]推导可得当前充电站 u 内电动汽车的排队长度 L_u 和平均等待时间 W_u , 如下式.

$$L_u = \frac{n_u^n \rho^{n_u+1} P_u(0)}{n_u! (1-\rho)^2} \times [1 - (K_u - n_u + 1) \times (1-\rho) \rho^{K_u-n_u} - \rho^{K_u-n_u+1}] \quad (3)$$

$$W_u = \frac{n_u^n \rho^{(n_u+1)} P_u(0)}{\lambda n_u! \left(1 - \frac{n_u^n \rho^{K_u}}{n_u!} P_u(0)\right) (1-\rho)^2} \times [1 - (K_u - n_u + 1) (1-\rho) \rho^{K_u-n_u} - \rho^{K_u-n_u+1}] \quad (4)$$

式(3)和式(4)中, $P_u(0)$ 表示系统处于平稳状态时, 充电站 u 内无电动汽车到达即初始状态的概率.

$$P_u(0) = \begin{cases} \left[\sum_{s=0}^{n_u-1} \frac{n_u^s \rho^s}{s!} + \frac{n_u^n \rho^{n_u} [1 - \rho^{K_u-n_u+1}]}{n_u! (1-\rho)} \right]^{-1}, \rho \neq 1 \\ \left[\sum_{s=0}^{n_u-1} \frac{n_u^s}{s!} + \frac{n_u^n}{n_u!} (K_u - n_u + 1) \right]^{-1}, \rho = 1 \end{cases} \quad (5)$$

电动汽车从不同位置选择不同路径到达充电站的能耗存在差异, 则电动汽车在充电站花费的总时间成本 T_u 有

$$T_u = t_u + W_u \quad (6)$$

式(6)中, 充电时间 t_u 取决于电动汽车到达充电站 u 时的剩余电量.

2.2 充电出行成本模型

研究路径选择问题的基础是数学图的构建^[5]. 为方便研究电动汽车充电路径规划策略, 将充电站路网结构抽象简化为图的形式来进行数学定义与描述. 定义有向赋权图 $G = (V, R, \Phi)$ 来表示一组由节点集 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_s\}$ 和边集 $R = \{r_0, r_1, \dots, r_D\}$ 组成的图拓扑结构, 以 $\Phi = \{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_D\}$ 表示 R 到 V 中元素有序对簇 $V \times V$ 的关联函数, 边集 R 中每条边 r_l 用三元组 (v_s, v_d, φ_l) 表示, 其中 $v_s, v_d \in V$ 分别表示起始节点和目标节点, φ_l 为对应边成本函数, v_s 和 v_d 之间的路径集表示为 $h_{s,d}$. 对有向赋权图 G 中 D 条边

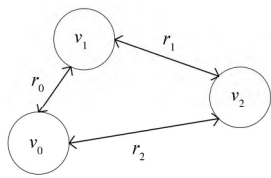
对应的边成本函数进行赋值,可用邻接矩阵 $M = (m_{sd})$ 表示简化后的图 G , 式(7)中, $m_{sd} = \infty$ 表示节点之间不存在有向边连接路段; 式(8)中, m_{sd} 表示节点 s 和节点 d 之间的距离。

与燃油汽车相比,电动汽车出行途中需考虑电池 SOC 阈值的约束. 传统路由算法应用在电动汽车背景时,需引入电池电量消耗模型来对电池能耗问题进行约束. 因此在路径集中每条边所代表的路段上引入路径能耗参量 E_c , 此时路段 r_l 在原有边成本函数的基础上添加能耗描述路段情况 $r_l = (v_s, v_d, \varphi_l, E_c)$.

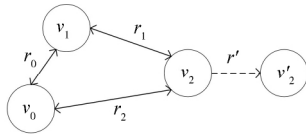
$$M = \begin{bmatrix} 0 & m_{12} & \infty & \cdots & \infty \\ m_{21} & 0 & m_{23} & \cdots & \infty \\ \infty & m_{32} & 0 & \cdots & \infty \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \infty & \infty & \infty & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$m_{sd} = \begin{cases} 0, & v_s = v_d \\ m_{sd}, & v_s \neq v_d, r_l \in E \\ \infty, & v_s \neq v_d, r_l \notin E \end{cases} \quad (8)$$

本文建立的路网模型是依据充电站分布情况将充电站节点化为 $v_u \in V$ 并引入至路网模型 $G_{(V,R,\Phi)}$ 中. 电动汽车到达充电站后至充电服务结束前存在时间成本消耗,因此在路网模型 $G_{(V,R,\Phi)}$ 中的每个充电站节点处引入虚拟节点 v'_u 来表示车辆完成充电服务后的状态,则虚拟节点与原节点集 V 共同构成集合 V' 且有 $V' = \{v | v \in V \cup v'_u, u = 1, 2, \dots\}$.



(a) 原始拓扑结构



(b) 引入虚拟边后的拓扑结构

图 1 引入充电时间成本的路网拓扑图

Fig. 1 The road network topology with charging time cost

如图 1 所示,假设电动汽车以 v_0 为源节点, v_2 为目标充电站,则可通过最短路径寻优的方法来获取从源节点到目标节点的最短路径. 电动汽车在到达充电站后会在站点耗费一定的时间成本,在每个

充电站节点处新增一个节点,二者组合成的节点集用于表示电动汽车到达充电站和离去的两个状态,节点之间由虚拟边 r' 相连. 对原图 G 的边集 R 进行扩展,有 $R' = \{r | r = R \cup r'\}$. 虚拟边的权重取电动汽车在充电站的总时间成本即式(6),图 G 中原边成本集扩展后有 $\Phi' = \{\varphi | \varphi = \Phi \cup T_u\}$.

2.3 能耗模型

城市道路等级通常划分为快速路、主干路、次干路和支路等四级. 道路等级的差异会影响电动汽车的电能消耗. 文献[22]根据实际数据建立能耗模型以计算电动汽车单位距离能耗,如式(9).

$$\begin{cases} E_c^1 = 0.247 + 1.520V_{ev,s}^{-1} - 0.004V_{ev,s} + 2.992 \times 10^{-5}V_{ev,s} \\ E_c^2 = -0.179 + 0.004V_{ev,s} + 5.492V_{ev,s}^{-1} \\ E_c^3 = 0.21 - 0.001V_{ev,s} + 1.531V_{ev,s}^{-1} \\ E_c^4 = 0.208 - 0.002V_{ev,s} + 1.553V_{ev,s}^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, E_c^1 、 E_c^2 、 E_c^3 、 E_c^4 分别表示电动汽车途径道路等级为快速路、主干路、次干路和支路时的单位距离能耗; $V_{ev,s}$ 为电动汽车平均速度, E_c 表示电动汽车出行路径总能耗. 此时电动汽车的剩余电量如式(10)和式(11)所示.

$$B_r = B_{init} - E_c \quad (10)$$

$$\Delta E = BC - B_r \quad (11)$$

其中, B_r 表示电池剩余电量; B_{init} 为初始电量; ΔE 表示充电电量; BC 为电池容量,单位均为 $\text{kW} \cdot \text{h}$.

2.4 动态定价模型

电动汽车充电入网后产生的负荷在高峰期可能会对电网稳定性产生一定影响,现阶段主要采用峰谷分时电价的方法,依据一天内电网使用情况来划分峰、谷时段,并按时段设定不同的电价以达到引导用户充电的目的[23]. 但用户侧负荷需求会受到地域环境等变化的影响,拥堵的变化可能会造成需求负荷与电价在峰谷值不匹配的情况. 因此本文提出一种基于充电拥挤度的定价模型,如式(12)~式(14)所示.

$$p_{u,t} = p_t + \beta_t p_f \quad (12)$$

$$\beta_t = L_u / K_u \quad (13)$$

$$p_t = \begin{cases} 0.76, & t \in (23:00, 7:00) \\ 0.95, & t \in (7:00, 10:00) \cup (12:00, 18:00) \cup (21:00, 23:00) \\ 1.18, & t \in (10:00, 12:00) \cup (18:00, 21:00) \end{cases} \quad (14)$$

式(12)中, $p_{u,t}$ 为充电站 u 在当前时刻 t 的电价,由

基础电价 p_t 和浮动电价 p_f 组成; β_t 表示当前时刻站内充电拥挤度. 其中基础电价受峰谷时段的影响, 峰时段为 10:00–12:00、18:00–21:00, 谷时段为 23:00–7:00, 其余为平时段^[6,24], 各时段的电价见式(14).

3 电动汽车充电引导规划模型

3.1 目标函数

电动汽车充电出行选择受到多因素影响. 本文在考虑出行距离、充电电价和充电站使用情况的因素下构建混合整数线性规划模型, 目标函数如式(15)所示. 考虑到用户的充电出行需求存在差异, 对影响因素采用赋权处理以满足不同用户需求.

$$\min[w_1 \sum_{l \in h_{s,d}} \varphi_l(v_s, v_d) y(v_s, v_d) \eta_{v_s, v_d}^{\text{SOC}} + w_2 p_{u,t} \Delta E_{c_u} c_u^{\text{type}} + w_3 c_u^I] \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{v_i, v_j \in V} y(v_i, v_j) - y(v_j, v_i) = \begin{cases} 1, & v_i = v_s \\ -1, & v_i = v_d \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式(15)中, w_1, w_2, w_3 为不同影响因素的权重系数, 第一项表示电动汽车出行成本, $\eta_{v_s, v_d}^{\text{SOC}}$ 表示电动汽车能耗约束, $\eta_{v_s, v_d}^{\text{SOC}} = 1$ 时电动汽车剩余电量足够到达充电站; 第二项为电动汽车充电价格成本, 其中 c_u^{type} 为二进制变量用于表示电动汽车充电类型: $c_u^{\text{type}} = 1$ 表示快充服务, $c_u^{\text{type}} = 0$ 表示慢充服务; 第三项为充电时间成本, c_u^I 为充电站 u 的充电桩使用空闲率. 式(16)中 $y(v_s, v_d)$ 为用于描述路径选择约束的二进制变量, 当电动汽车出行路径包含边 $r_l(v_s, v_d)$ 时 $y(v_s, v_d) = 1$.

3.2 结合权重的目标函数计算

信息熵可以衡量各因素指标在评价中的重要性, 并从客观角度来过滤原始数据中的冗余信息^[14], 从而构造权重进行决策的评价分值计算. 通过引入信息论中信息熵的概念, 能够从客观角度来衡量指标, 并将不同影响因子的内部差异以信息量的形式进行表达. 电动汽车用户在选择充电站时各影响因素在性质和量纲等上面存在一定差异, 因此首先需要对各指标数据进行无量纲化处理. 设充电站数量为 u , 影响因子数为 q , 初始决策矩阵 $X = (x_{ij})$ 有

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1q} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{u1} & x_{u2} & \cdots & x_{uq} \end{bmatrix} \quad (17)$$

为消除量纲影响对矩阵 X 进行标准化处理^[25], 如式(18)~(23)所示. 式(18)根据效率型和成本型影响因素对 x_{ij} 分别进行标准化以得到 x_{ij}^* , 其中 $(x_{ij})_{\min}^j$ 表示第 j 项因子下的最小值, $(x_{ij})_{\max}^j$ 同理; 式(19)分别计算第 j 项指标下第 i 个节点所占比重得到对应概率 p_{ij} ; 式(20)、式(21)计算出各指标对应的信息熵 E_j 与信息效用值 I_j ; 式(22)中 w_j 即为基于信息熵计算得出的各影响因素权重系数, 且 $\sum_{j=1}^q w_j = 1$.

使用熵权法计算获得的权重具有一定的适应性^[14], 三种影响因素的偏重存在差异导致其分别适应于不同的权重系数, 权重系数值越大表明电动汽车用户对应影响因素的需求越大. 将无量纲化后的数据赋予权重来计算目标成本以作为评价分值 S_j , 如式(23)所示, 即可确定每个站点的影响因素成本并进行充电路径的优先级选择.

$$\begin{cases} x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}^j}{(x_{ij})_{\max}^j - (x_{ij})_{\min}^j} \\ x_{ij}^* = \frac{(x_{ij})_{\max}^j - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max}^j - (x_{ij})_{\min}^j} \end{cases} \quad (18)$$

$$p_{ij} = x_{ij}^* / \sum_{i=1}^u x_{ij}^* \quad (19)$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln u} \sum_{i=1}^u p_{ij} \ln p_{ij} \quad (20)$$

$$I_j = 1 - E_j \quad (21)$$

$$w_j = I_j / \sum_{i=1}^u I_j \quad (22)$$

$$S_j = \sum_{j=1}^q w_j x_{ij}^* \quad (23)$$

3.3 电动汽车充电出行路径规划流程

根据上节内容, 可将式(15)描述的规划问题在增加耗电量约束条件的前提下使用 Dijkstra 算法思想进行求解.

Step 1 输入涵盖充电站分布的路网拓扑图邻接矩阵 M 、道路参数与充电站参数.

Step 2 仿真模拟生成电动汽车的初始位置 v_s 、初始电量 B_{init} 、出发时间 t 和平均速度 $V_{\text{ev},s}$.

Step 3 确定源点集 V_s 和可选目标充电站点集 V_d . 通过 Dijkstra 算法计算以源点集 V_s 中每个元素 $v_s \in V_s$ 为起点到达可选目标站点集合中的所有站点的最短路径 $h_{s,d}$, 并计算各路径对应距离 m_{sd} , 得到源点到可选目标充电站点的最短距离矩阵 M' .

Step 4 根据能耗模型计算电动汽车到达各

个目标充电站的路径总能耗 E_c , 通过式(10)获取剩余电量, 并结合能耗约束条件判断电动汽车能否到达各个目标充电站点; 对目标点集 V_d 进行遍历, 若未满足能耗约束令对应路径 $h_{s,d}$ 的最短距离 $m'_{sd} = \infty$, 否则继续遍历直至结束. 保留能耗约束下能够到达的充电站节点并移除 $m'_{sd} = \infty$ 的站点, 更新最短距离矩阵 M' 和目标充电站点集 V'_d .

Step 5 获取当前时刻对应的基础电价 p_i 并计算电价 $p_{u,t}$. 根据最短距离 m'_{sd} , 各个充电站电价 $p_{u,t}$ 和使用空闲率 c_u^I 三种影响因素的原始数据进行无量纲化处理, 根据式(22)计算获得各指标的权重集合 $w_j = \{w_1, w_2, w_3\}$.

Step 6 根据权重集合 w_j 求解式(15)混合整数线性规划模型, 获得模型最优解. 根据最优解结果确定充电站的选择并根据式(4)、式(10)和式(11)计算电动汽车用户到达充电站 u 后预计等待时间 W_u 和充电费用 $p_{u,t} \Delta E$ 并返回 $(m'_{sd}, h_{s,d}, W_u, p_{u,t} \Delta E)$.

4 仿真分析

4.1 仿真参数

本文使用 Python3.7 对所建立模型进行仿真模拟. 模型选取昆明市某区域作为研究区域, 占地面积约 25.98 km^2 , 路网结构与道路参数均使用 GIS 软件从百度地图中提取, 区域内共具有 42 个节点和 77 条道路, 涵盖 9 个充电站, 如图 2 所示. 根据路网结构依据图论思想构建拓扑图并提取邻接矩阵, 如表 1 所示. 具体道路参数如表 2 所示.

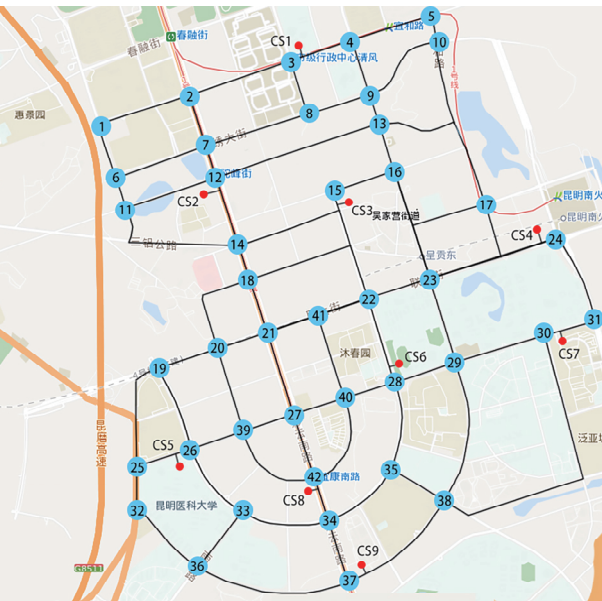


图 2 研究区域内充电站分布与路网拓扑结构
Fig. 2 Charging station distribution and road network topology in the study area

表 1 路网拓扑邻接矩阵

Tab. 1 The topological adjacency matrix of road network

节点	1	2	3	...	41	42
1	0	1	inf	...	inf	inf
2	1	0	1.1	...	inf	inf
3	inf	1.1	0	...	inf	inf
...
41	inf	inf	inf	...	0	Inf
42	inf	inf	inf	...	inf	0

表 2 道路参数

Tab. 2 Road parameters

道路编号	初始节点	终止节点	道路等级	道路距离/km
1	1	2	3	1
2	1	6	2	0.6
3	2	3	4	1.1
...
76	36	37	3	1.6
77	37	38	3	1.3

充电站模型仿真时间以小时为单位按全天 24 h 进行仿真, 慢充功率为 10 kW, 快充功率为 30 kW, 充电效率均为 90%; 设置电动汽车电池容量均为 $60 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 初始电量随机选取 SOC 的 10%~50%. 各个充电站的服务率均为 0.33, 具体参数设置如表 3 所示.

表 3 充电站模型参数设置

Tab. 3 Charging station model parameters setting

充电站	到达率 λ	充电桩数/个	最大等待时长/h
CS ₁	1.79	8	1
CS ₂	2.25	7	1
CS ₃	1.15	5	1
CS ₄	1.28	10	1
CS ₅	1.79	6	1
CS ₆	2.12	5	1
CS ₇	1.82	9	1
CS ₈	1.50	6	1
CS ₉	1.61	8	1

4.2 仿真分析

4.2.1 基于多目标成本的充电规划结果分析 以某电动汽车用户个体为例, 设置在两种不同的充电规划策略下电动汽车均在起始节点 v_{20} 出发, 起始时间为 17:00. 策略 1 设置为就近策略选择充电

站点^[26];策略 2 设置为采用多目标规划策略即本文规划方法,在综合考虑多因素的前提下根据混合整数线性规划模型选择最优站点进行充电.在剩余电量约束的前提下,各影响因素的计算权值见表 4.

表 4 各影响因素权值

Tab. 4 The weight of each influencing factors

影响因素	计算权值
出行距离	0.3750
充电费用	0.3504
充电空闲率	0.2746

表 5 充电出行路径规划结果

Tab. 5 Charging path planning results

v_s	出行距离/km	路径	v_t	评价 分值
v_{20}	1.9	$v_{20} \rightarrow v_{39} \rightarrow v_{42}$	v_{42}	0.787
	2.7	$v_{20} \rightarrow v_{21} \rightarrow v_{18} \rightarrow v_{15}$	v_{15}	0.737
	1.5	$v_{20} \rightarrow v_{39} \rightarrow v_{26}$	v_{26}	0.721
	3.1	$v_{20} \rightarrow v_{39} \rightarrow v_{42} \rightarrow v_{33} \rightarrow v_{37}$	v_{37}	0.715
	3.8	$v_{20} \rightarrow v_{21} \rightarrow v_{41} \rightarrow v_{22} \rightarrow v_{23} \rightarrow v_{24}$	v_{24}	0.600
	2.1	$v_{20} \rightarrow v_{21} \rightarrow v_{18} \rightarrow v_{14} \rightarrow v_{12}$	v_{12}	0.451

由表 4 可知各影响因素的权值.从当前起点 v_{20} 到达各个充电站的路径规划与对应目标值如表 5 所示.根据目标函数值可以看出,用户充电出行的最优选择是 CS_8 充电站.具体路径如图 3 所示,虚线标注路段表示策略 1 下的充电站点选择与行驶路径;粗实线标注路段表示策略 2 下的充电站点选择与形式路径.不同策略的充电出行成本如表 6 所示.

表 6 两种方法充电出行成本对比

Tab. 6 Comparison of charging costs between two methods

充电路径 选择方式	排队等待 时间/min	出行距 离/km	充电服务 费用/元
策略 1	15.25	1.5	50.68
策略 2	8.75	1.9	48.76

从表 6 中可以看出,使用该规划策略致使电动汽车出行距离增加,但充电排队等待时间减少了 42.6%,充电服务费用减少了 5.8%,说明在综合多目标因素的影响下该方法能够从综合角度考虑,提高电动汽车路径规划的合理性.

4.2.2 基于用户需求的规划结果分析 不同电动汽车用户充电出行需求不同.为满足场景多元化对

式(12)中的参数(w_1, w_2, w_3)从主观角度进行调整.三种目标场景下电动汽车用户均以 v_{20} 作为起始节点,充电出行路径规划后结果如表 7.

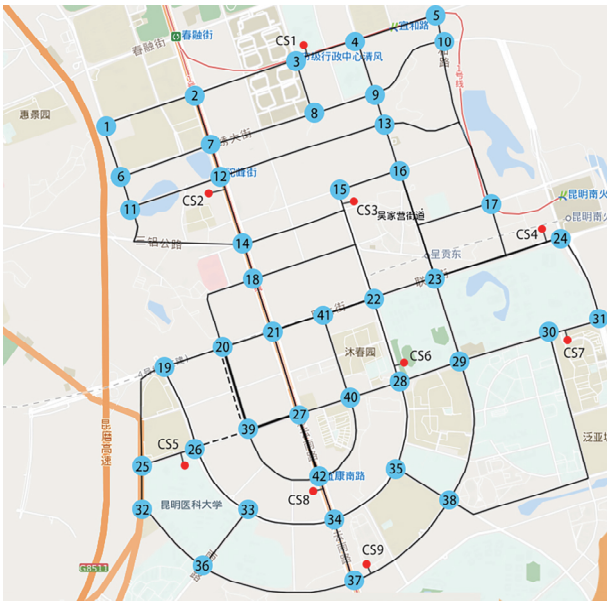


图 3 某 EV 充电选择及路径规划结果
Fig. 3 Charging selection and path planning results of EV

表 7 不同目标场景下电动汽车充电出行路径规划结果
Tab. 7 Electric vehicle charging path planning results under different target scenarios

不同 场景	参数	排队等待 时间/min	出行距离 /km	充电服务 费用/元
场景 1	(0.8,0.1,0.1)	15.25	1.5	50.68
场景 2	(0.1,0.8,0.1)	11.81	3.8	47.58
场景 3	(0.1,0.1,0.8)	4.28	2.7	51.16

从表 7 可看出,电动汽车用户不同的充电需求产生的规划结果偏重不同.场景 1 中用户充电出行偏重于出行距离最短,相比于场景 2 和场景 3 能看出场景 1 下出行距离分别下降 60.5%,44.4%;场景 2 中用户充电出行偏重于充电费用最低,可以看出充电服务费用这一因素场景 2 相比于场景 1 和场景 3 降低了 6.1%,7.0%;场景 3 充电出行偏重于排队站等待时间最短,相比于场景 1 和场景 2 的充电排队等待时间减少了 71.9%,63.8%.从实验结果可看出,所提出的电动汽车用户充电出行引导规划模型能够较好地适应不同用户的需求以进行充电选择.

4.2.3 充电站模型参数的敏感性分析 充电站的服务强度易受到充电站基础设施配置的影响,而充电排队时间与服务能力有关,充电排队时间的变化影响到用户充电时间成本;同样充电站电价的变化

也会对充电费用成本产生一定影响. 由于路网拓扑中充电桩的位置已固定, 故本节在保持出行成本不变的基础上, 通过对充电桩模型参数与充电电价和排队时间的权重比值进行敏感性分析, 以研究充电成本对电动汽车用户充电出行引导策略的影响.

保持路网拓扑与充电桩位置不变, 通过改变电价与排队时间因素的权重比值来探讨其对充电成本的影响. 图 4 给出了 w_2 和 w_3 比值分别设置为 $w_2 : w_3 \in \{1:1, 1:3, 1:5, 1:7, 1:9\}$ 时增加站点流量对目标函数结果的影响, 从图 4 可看出, 不同权重比值整体趋势均为随着充电桩充电流量的增加致使目标函数结果逐渐增加, 且 5 组权重比值呈现相同增长趋势. 当权重比值为 $w_2 : w_3 = 1:3$ 时目标结果变化幅度最大; 之后随着权重 w_3 的增大结果变化幅度逐渐缩小, 表明在权重比值达到 $1:3$ 时能够有效减少充电成本, 随后增加权重比值对充电成本的影响逐渐减小. 这说明在实际应用中保持出行距离不变的前提下, 充电桩的电价与服务能力的影响比重会对用户充电行为产生影响, 可根据此在考虑经济效益的前提下设置充电桩电价与基础设施配置.

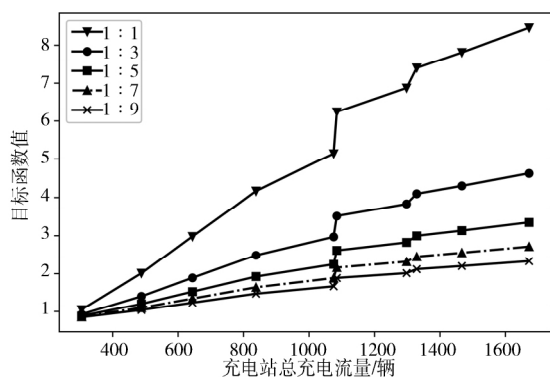


图 4 不同权重比值对目标函数的影响

Fig. 4 The influence of different weight ratios on objective function

由式(2)和式(4)易知, 充电桩内的桩数的设置会影响充电桩的服务能力, 进而影响充电桩排队等待时间. 图 5 描述了不同到达率下电动汽车充电排队等待时间对充电桩数设置的敏感性. 从图 5 可以看出, 随着充电桩数的增加充电服务能力逐渐增强, 电动汽车的充电平均等待时间整体呈下降趋势, 且下降斜率逐渐减少, 最终趋于平缓. 此外到达率为 0.79 时随着桩数的增加下降趋势相比于其他到达率更早趋于平缓状态. 该结果说明充电桩可通过安装更多的充电桩以减少排队等待时间, 而增加充电桩数对服务能力的提高有限, 在实际应用中可

考虑充电桩成本的基础上结合充电桩流量来合理设置站点桩数, 在提高用户充电服务质量的同时尽可能提高利用率.

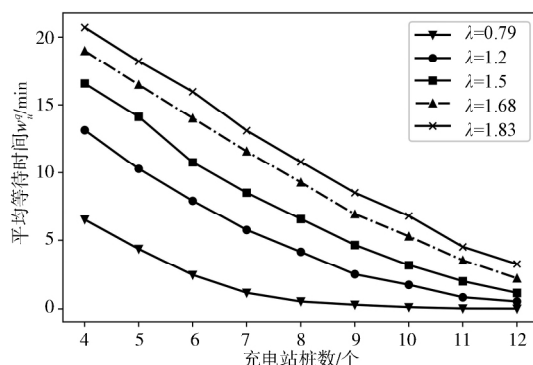


图 5 不同到达率下充电桩桩数对等待时间的影响

Fig. 5 The effect of the number of charging piles on waiting time under different arrival rates

5 结 论

本文研究了电动汽车在多种因素影响下的充电路径规划问题, 针对该问题文中构建了混合整数线性规划模型来解决包括用户出行成本和充电成本最优的多目标规划问题. 考虑到不同用户具有不同出行需求, 对三种目标状态下进行最优充电选择规划以满足用户需求差异性. 仿真证明该方法能够较好地达到综合目标最优, 并能够有针对性地根据用户需求差异进行充电规划选择以降低相应成本. 此外, 在充电桩站点及出行成本固定的情况下, 文中构建了站点随机充电服务排队模型以模拟充电服务过程, 并对站内服务强度和基础设施配置进行敏感性分析以研究其对用户出行成本的影响, 为提高充电桩配置的合理性提供了参考.

本文目前研究主要在路网拓扑结构上结合能耗约束为用户提供充电选择并规划出行路径, 未考虑对用户充电行为进行分析以获取其偏好. 未来将结合实际充电桩数据和出行数据以开展用户行为习惯挖掘, 进一步验证模型的合理性, 同时以站点选址与设施优化为方向进行下一步研究.

参考文献:

- [1] Ma J, Lyu X D, Chen Y S, et al. Current status and countermeasures for China's new energy automobile industry and technology development [J]. China J Highw Transp, 2018, 31: 1. [马建, 刘晓东, 陈轶嵩, 等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. 中国公路学报, 2018, 31: 1.]

- [2] Noel L, de Rubens G Z, Sovacool B K, *et al.* Fear and loathing of electric vehicles: The reactionary rhetoric of range anxiety [J]. ERSS, 2019, 48: 96.
- [3] Su S, Yang T T, Li Y J, *et al.* Charging route planning for electric vehicles considering real-time dynamic energy consumption [J]. AEPS, 2019, 43: 136. [苏粟, 杨恬恬, 李玉璟, 等. 考虑实时动态能耗的电动汽车充电路径规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43: 136.]
- [4] Morlock F, Rolle B, Bauer M, *et al.* Time optimal re-routing of electric vehicles under consideration of available charging infrastructure and a detailed consumption model [J]. IEEE T Intell Transp, 2020, 21: 5123.
- [5] Huber G, Bogenberger K, van Lint H. Optimization of charging strategies for battery electric vehicles under uncertainty [J]. IEEE T Intell Transp, 2022, 23: 760.
- [6] Luo W X, Chang X Q, Fu R, *et al.* Charging-discharging scheduling strategy for electric vehicles considering supply and demand [J]. P CSU-EPSA, 2022, 34: 106. [罗维祥, 常喜强, 伏睿, 等. 考虑供需需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34: 106.]
- [7] Rozas H, Munoz-Carpintero D, Saez D, *et al.* Solving in real-time the dynamic and stochastic shortest path problem for electric vehicles by a prognostic decision making strategy [J]. Expert Syst Appl, 2021, 184: 115489.
- [8] Zhang S, Chen M, Zhang W, *et al.* Fuzzy optimization model for electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations [J]. Expert Syst Appl, 2019, 145: 113123.
- [9] Zhang Y, Wu B, Chiang Y Y, *et al.* BiS4EV: a fast routing algorithm considering charging stations and preferences for electric vehicles [J]. Eng Appl Artif Intel, 2021, 104: 104378.
- [10] Li H, Chen H. Mixed traffic network equilibrium with battery electric vehicles considering charging queuing time [J]. J Jilin Univ(Technol Ed), 2021, 51: 1684. [李浩, 陈浩. 考虑充电排队时间的电动汽车混合交通路网均衡[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51: 1684.]
- [11] Tan X, Sun B, Wu Y, *et al.* Asymptotic performance evaluation of battery swapping and charging station for electric vehicles [J]. Perform Evaluation, 2018, 119: 43.
- [12] Tan X, Sun B, Tsang D. Queueing network models for electric vehicle charging station with battery swapping [C]//IEEE International Conference on Smart Grid Communications. [S.l.]: IEEE, 2015.
- [13] Esmailirad S, Ghiasian A, Rabiee A. An extended M/M/K/K queueing model to analyze the profit of a multiservice electric vehicle charging station [J]. IEEE T Ven Technol, 2021, 70: 3007.
- [14] Sheng R, Tang Z, Xue J C. Dynamic evaluation method of EV charging station service capability under multi indicators [J]. P CSEE, 2021, 41: 4891. [盛锐, 唐忠, 薛佳诚. 多指标下EV充电站服务能力动态评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41: 4891.]
- [15] Xiao D, An S, Cai H, *et al.* An optimization model for electric vehicle charging infrastructure planning considering queuing behavior with finite queue length [J]. J Energ Storage, 2020, 29: 101317.
- [16] Zhang D, Jiang J C, Zhang W G, *et al.* Optimal configuration of charging spots for electric taxis [J]. Trans China Electrotech Soc, 2015, 30: 181. [张帝, 姜久春, 张维戈, 等. 电动出租车充电桩优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30: 181.]
- [17] Yu J W, Sun Y L, Zhang X D. Charging load forecasting considering the unbalanced development of EV [J]. Electr Meas Instrum, 2019, 56: 43. [余军伟, 孙云莲, 张笑迪. 考虑发展不均衡的电动汽车充电负荷预测[J]. 电测与仪表, 2019, 56: 43.]
- [18] Kumar N, Kumar T, Nema S, *et al.* A comprehensive planning framework for electric vehicles fast charging station assisted by solar and battery based on Queueing theory and non-dominated sorting genetic algorithm-II in a coordinated transportation and power network [J]. J Energ Storage, 2022, 49: 104180.
- [19] Yan Y J, Zha W X, Shi J G, *et al.* Mixed network equilibrium model with stochastic charging demand [J]. J Jilin Univ(Technol Ed), 2022, 52: 136. [闫云娟, 查伟雄, 石俊刚, 等. 具有随机充电需求的混合动态网络平衡模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52: 136.]
- [20] Ge S Y, Li R, Han J, *et al.* Charging station planning considering probability behavior characteristic of electric taxi [J]. AEPS, 2016, 40: 50. [葛少云, 李荣, 韩俊, 等. 考虑电动出租车随机概率行为特性的充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40: 50.]
- [21] Li R Q, Su H Y. Optimal allocation of charging facilities for electric vehicles based on queueing theory

- [J]. AEPS, 2011, 35: 58. [李如琦, 苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35: 58.]
- [22] Song Y Y. Energy consumption modeling and cruising range estimation based on driving cycle for electric vehicles [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. [宋媛媛. 基于行驶工况的纯电动汽车能耗建模及续航里程估算研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.]
- [23] Deng H Q, Zhang X F, Zeng J F, *et al.* Orderly charging and discharging scheduling strategy of electric vehicle based on dynamic TOU price [J]. J Hebei Univ Sci Tech, 2022, 43: 240. [邓慧琼, 张晓飞, 曾凡淦, 等. 基于动态分时电价的电动汽车有序充放电调度策略[J]. 河北科技大学学报, 2022, 43: 240.]
- [24] Cao F, Hu J T, Luo J B, *et al.* Capacity configuration of fast charging stations based on EV path simulation under dynamic model of transportation network [J]. Electr Pow Autom Eq, 2022 42: 107. [曹昉, 胡佳彤, 罗进奔, 等. 基于路网动态模型下 EV 路径模拟的快速充电站容量配置[J]. 电力自动化设备, 2022 42: 107.]
- [25] Yu X Y, Wei J L, Wei Y L, *et al.* Study on the decision of airport taxi drivers based on income priority [J]. J Sichuan Univ (Nat Sci Ed), 2020, 57: 689. [俞雪永, 魏金岭, 魏弋力, 等. 基于收益优先的机场出租车司机决策研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2020, 57: 689.]
- [26] Duan P P, Liu L. Design and research of intelligent charging station management system [J]. Computer Tech Dev, 2019, 29: 200. [段芃芃, 刘锂. 智能充电站管理系统设计与研究[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29: 200.]