

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.236015

基于交通-电力均衡耦合的电动汽车快充站与配电网联合规划

张美霞¹, 张倩倩¹, 杨秀¹, 余文昶², 曹俊波²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 中国华电集团有限公司上海分公司, 上海 200126)

摘要: 针对现有充电桩规划大多忽略配电网容量上限, 且交通网、快充网以及配电网耦合关系考虑单一导致电动汽车大量接入产生配网负载不均的问题, 提出一种基于交通-电力均衡耦合的电动汽车快充站与配电网双层联合规划模型。首先, 基于海量网约车订单数据进行数据挖掘和出行特征融合, 得到快充负荷时空分布。然后, 基于交通网-快充网-配电网之间的信息交互与能量流动关系提出均衡分区耦合模型, 并在此基础上建立电动汽车快充站与配电网双层联合规划模型, 采用遗传算法与混合整数线性规划相结合的方法求解。最后, 基于成都市主城区路网, 以54节点配电网为例开展仿真分析, 结果表明, 提出的双层联合规划模型对于电动汽车快充站规划具有一定的可行性, 且均衡耦合模型可以优化配网分区结果, 在一定程度上提高了配电网的安全性和稳定性。

关键词: 电动汽车; 网约车数据挖掘; 交通-电力耦合; 快充站规划; 配电网扩展

Joint planning of electric vehicle fast charging stations and distribution network based on a traffic-electricity equilibrium coupling model

ZHANG Meixia¹, ZHANG Qianqian¹, YANG Xiu¹, YU Wenchang², CAO Junbo²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. China Huadian Corporation Ltd. Shanghai Branch, Shanghai 200126, China)

Abstract: There is a problem in that most existing electric vehicle (EV) charging station planning ignores the upper limit of distribution network capacity. Also, considering the single coupling relationship between transportation, fast charging and distribution network, leads to large amount of EV access and uneven distribution network partition. Thus a joint planning model of EV fast charging stations and distribution network based on a traffic-electricity equilibrium coupling model is proposed. First, data mining and travel feature fusion are carried out based on massive online hailing order data. Then, an equilibrium partition coupling model is proposed, and on this basis, a two-layer joint programming model of EV fast charging station and distribution network is established. This is analyzed by a combination of genetic algorithm and mixed integer linear programming. Finally, based on the main road network in Chengdu, with a 54-node distribution network as an example to carry out the simulation analysis, the results show that the presented double joint planning model has a certain feasibility, and the coupling model can optimize the distribution network partition results, to a certain extent, and improve the security and stability of the distribution network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207121).

Key words: electric vehicles; online car-hailing data mining; traffic-electricity coupling; fast charging stations planning; distribution network expansion

0 引言

伴随着“双碳”目标的提出以及“新型电力系统”建设的持续推进, 新能源汽车凭借其低碳环保、清洁高效的显著优势, 将成为能源转型下的战略选

择^[1]。然而, 高渗透率大功率电动汽车(electric vehicles, EV)快充负荷的接入会导致配网负荷增长、变压器过载以及配网投资运行成本增加, 对交通网和电网的接纳能力及安全运行带来巨大冲击。电动汽车快充网作为电动汽车和电网的联结枢纽, 与城市交通网、配电网逐渐形成相互依存的高度耦合网络^[2]。因此, 进行电动汽车快充网与交通网、配电网的耦合关系及联合规划研究具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207121); 上海电力人工智能工程技术研究中心研究项目资助(19DZ2252800)

目前国内外学者针对电动汽车快充网的规划与调度应用开展了广泛研究^[3]。文献[4]兼顾充电站、电动汽车用户以及电网三方面利益，确定充电站选址定容模型。文献[5]采用密度峰值的聚类方法分析充电需求空间分布密集程度，按各群簇充电需求比例确定相应群簇中心的充电站容量。文献[6]根据快充站的运行状态以及 EV 的快充特性，通过制定差异化的服务费激励机制，引导用户在合适的时机进行充电行为。文献[7]提出了满足快充需求的含储能复合型充电站的充电优化策略，并合理引导满足 EV 快充需求的充电路径选择，考虑 EV 快充需求的短时效应，通过储能降低快充需求的负面影响。

上述文献从交通网和电网两方面刻画电动汽车的充电行为并进行充电设施规划，但均限于仿真模拟层面，缺乏真实数据支撑。为此，文献[8]将对历史交通数据与气象数据进行分析，并对交通流量进行聚类与影响因素分析，建立决策树进而预测不同功能区域内 EV 充电需求时空分布。文献[9]对二维出行数据进行聚类分析，挖掘道路拥堵情况对充电负荷预测精准度的影响程度。

而针对考虑配网接纳 EV 快充负荷能力的充电站规划研究中，文献[10]采用熵权修正的层次分析法并结合配网节点电压变化情况评估配网对 EV 充电站的接纳能力。文献[11]考虑 EV 充电负荷与分布式储能，建立综合投资运行及失负荷成本最小的联合规划模型。文献[12]针对配电网的馈线布局问题，考虑配电线路通道资源的利用情况建立线路可用裕度模型，对 EV 充电站进行优化规划。文献[13]综合交通路网、道路流量以及配电网容量约束等因素，构建了 EV 充电站选址与定容优化模型。文献[14]对路网与电网可靠性进行综合评估，在保证二者双重可靠性的前提下对 EV 充电站规划结果进行校验。

上述研究虽然陆续考虑交通网及配电网相关约束，但往往侧重于在计及配电网容量约束的前提下进行 EV 充电基础设施的规划，针对于 EV 充电网-交通网-配电网之间的耦合关系往往考虑单一，并较少涉及快充站与配电网联合规划研究。

因此，针对上述情况，提出一种基于交通-电力均衡耦合模型的电动汽车快充站与配电网联合规划模型。在 EV 快充需求预测部分，利用数据挖掘分析出行特征，刻画 EV 负荷时空分布，为充电设施规划方案提供负荷输入量，帮助快充网络设计覆盖方式；交通-电力均衡耦合与双层规划模型，可为交通网-快充服务网-配电网三网之间的有效互动提供理论基础，进一步降低 EV 快充行为对电网运行的影响，优化充电服务网分布，延缓电网扩容，同时

优化配网分区，平衡负荷分布。

1 总体框架

整体研究框架如图 1 所示，主要研究内容包括基于数据挖掘的电动汽车快充负荷预测以及电动汽车快充站与配电网双层联合规划两部分。

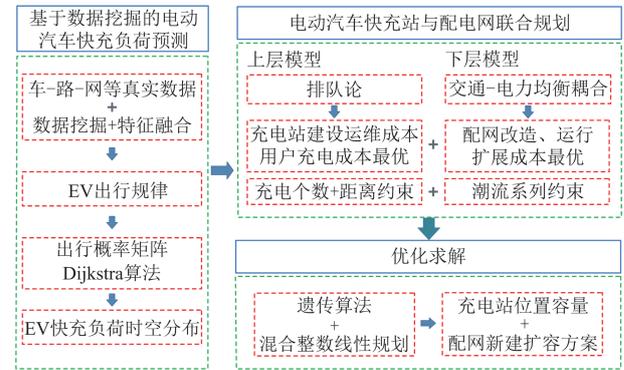


图 1 整体研究框架图

Fig. 1 Overall research framework

2 EV 快充需求预测

考虑到电动汽车同时兼具电网的负荷特性与城市路网的交通特性，因此充分考虑交通网络以及 EV 出行规律等信息，通过海量车辆轨迹数据挖掘用户的出行特征是精确预测 EV 充电需求的前提。

2.1 数据预处理

本次研究数据来自于由“滴滴盖亚”数据开放计划(<https://gaia.didichuxing.com>)提供的成都市滴滴网约车用户轨迹及订单数据集，轨迹采集时间间隔为 3~4 s，时间跨度为 2016 年 11 月 1 日—11 月 30 日。数据集内的主要数据字段包括车辆 ID、订单 ID 和经纬度位置等。

针对质量参差不齐的网约车数据，通过数据预处理可以提升数据质量、缩短计算过程，具体如下。

- 1) 数据清洗：包括异常值处理、数据填补或剔除。
- 2) 数据转化：将数据时间戳格式与标准时间(年-月-日-时-分-秒)进行转化。
- 3) 数据筛选：对行程无效订单以及本次研究范围外(经度：104.0472-104.1090，纬度：30.6385-30.6912)的网约车数据进行删除。
- 4) 数据集成：分别选取完整工作日与休息日的订单与轨迹数据，并整合到两个数据集中。

经过数据预处理，最终得到工作日 211 319 条、休息日 80 861 条有效出行数据。

2.2 数据特征融合

预处理后的订单数据虽然无冗余且有效性高，

但仍无法直观获取城市居民的出行特征, 因此需要进一步对数据进行出行特征融合与挖掘。

2.2.1 道路拓扑结构

为方便后续构建交通-电力均衡耦合模型, 首先通过 ArcGIS 开源网站获取城市区域路网图, 选取成都市中心城区作为路网构建对象并筛选一级、二级道路作为主要组成部分, 其中城市整体区划及简化后路网如图 2 所示。

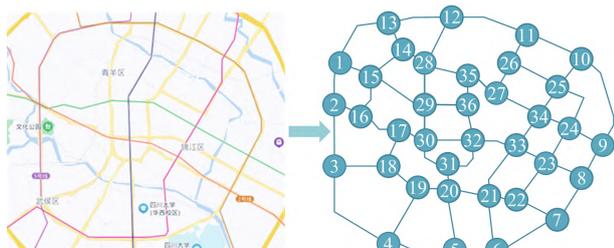


图 2 成都市中心城区实际路网及对应路网节点图

Fig. 2 Actual road network of Chengdu downtown area and corresponding road network node diagram

2.2.2 POI 功能区域划分

将所选研究区域按其功能定位与建筑属性划分为居民区(H)、工作区(W)、商业区(B)以及生活服务区(P), 通过高德地图抓取并筛选成都市地理兴趣点(point of interest, POI)数据, 主要包含名称、经纬度、所属类别等信息, 具体 POI 属性划分情况见文献[15], 并依据 POI 属性和对应节点地图经纬度对路网节点进行功能属性划分, 如表 1 所示。

表 1 路网节点功能分区

Table 1 Functional zones of road network nodes

功能分区	路网节点
居民区	1、5、8、11、12、17、26、35、36
公共服务区	2、4、9、10、13、15、24、32
工作区	3、6、7、14、16、25、27、30、31、34
商业区	18、19、20、21、22、23、28、29、33

2.2.3 出行规律挖掘

基于数据处理与挖掘技术得到城市居民出行特征, 从出行量对比、转移概率以及出行起点方面进行分析, 具体分析结果可见图 A1—图 A3。

2.3 EV 快充需求建模

2.3.1 能耗及路径选择模型

假设每日行程起始时刻 EV 电池处于满电状态, 为防止电池损伤, 令 EV 初始荷电状态(state of charge, SOC)取值为 0.9。受交通拥堵影响不同行驶速度下各等级道路下单位里程动态耗电量参考文献[16-17]。选择 Dijkstra 算法进行车辆行驶至目的地过程中最短路径的规划。车辆停留时间是从轨迹数

据内不同功能区之间的车辆停留时间数据集中进行抽取。

2.3.2 充电需求判断

考虑到用户用电焦虑以及下一段行程的需要, 需要保留一定的电量裕度, 因此假设当电池电量低于安全裕度(设为 0.2)或无法满足下一段行程需要时产生快充需求。

EV 快充需求时空分布预测框架如图 3 所示。

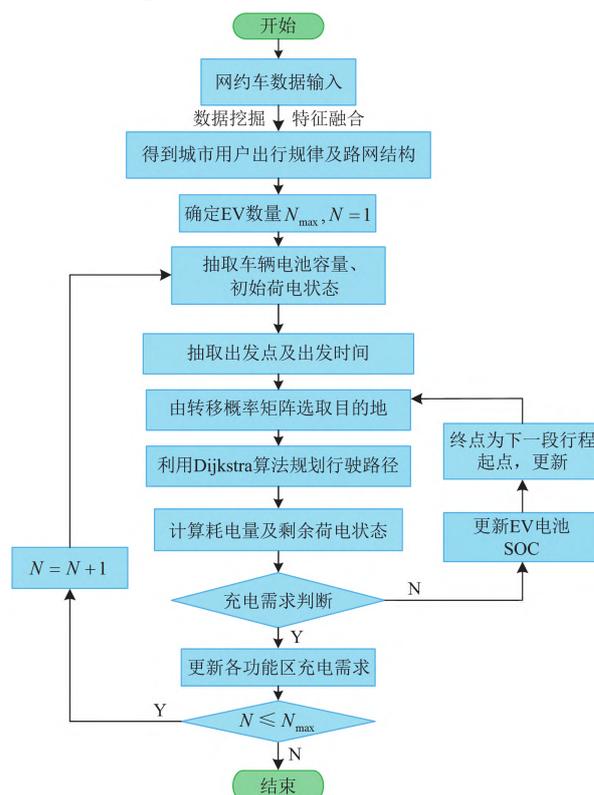


图 3 电动汽车快充需求时空分布预测框架

Fig. 3 A prediction framework for temporal and spatial distribution of EV charging demand

3 EV 快充站与配电网联合规划模型

3.1 排队论原则

每个集中快充站可近似看作一个排队系统, EV 用户到达快充站的特点符合 M/M/C 排队系统, 即进入快充站过程服从泊松分布, 站内服务时间服从负指数分布, 服务系统先到先得。

因此参考 M/M/C 排队系统各指标公式, EV 用户充站的到达频率、快充站服务能力与强度、空闲概率各项指标可见文献[18], 最终车辆在快充站 z 内的排队等候时间期望为

$$W_{qz} = \frac{N_{mz}^{N_{mz}} \rho_z^{N_{mz}+1} P_{z0}}{\lambda_z N_{mz}! (1 - \rho_z)^2} \quad (1)$$

式中: W_{qz} 为快充站 z 的排队时间期望; N_{mz} 为快充

站 z 内充电机数量; ρ_z 为快充站 z 的服务强度; P_{z0} 为快充站 z 内充电桩全部空闲的概率; λ_z 为选择快充站 z 充电的 EV 用户到达率(辆/h)。

3.2 交通-电力均衡耦合模型

电动汽车以充电服务网作为其能源支撑, 同时兼具交通网与配电网的双重特性, 以电动汽车为联结, 三网之间运行状态相互影响, 存在高度融合的关系。耦合网络之间的信息交互框架如图 4 所示。

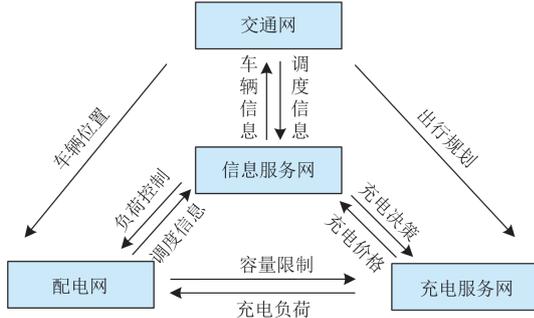


图 4 耦合网络信息交互图

Fig. 4 Information interaction diagram of coupling network

因此, 探讨充电服务网、交通网、配电网之间的耦合关系与耦合方法, 构建耦合模型, 可为考虑电动汽车需求的快充站与配电网联合规划模型提供理论支撑。

3.2.1 耦合方式

电动汽车充电服务网、交通网和配电网之间不仅存在地理位置的耦合关系, 还包含外界政策以及容量制约的耦合关系^[19], 为此, 提出耦合原则。

1) 空间耦合。考虑到交通网与配电网的空间重合特性, 优先耦合地理位置最近的交通网、充电服务网及配电网节点。引入地理位置度函数 D_l 表征路网节点 p 与任一配网节点 q 的距离, 该指标往往为耦合的第一指标。

$$D_{l(p,q)} = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2} \quad (2)$$

式中: x_p 、 y_p 和 x_q 、 y_q 分别为路网、配网节点位置; $p \in a$, a 为路网总节点数; $q \in b$, b 为配网节点数。

2) 容量裕度耦合。由于配网节点存在容量上限, 接纳负荷过高会危及配网的安全性, 无法满足充电服务网节点内 EV 快充负荷的无限接入, 因此引入容量裕度指标 P_l 用于描述电动汽车负荷对配网运行的影响程度, 如式(3)所示。

$$P_{l(p,q)} = P_{\max}^q - \sum_{k=0}^b (P_{\text{base}}^q(t) + P_{\text{charge}}^z(t)) \quad (3)$$

式中: P_{\max}^q 为配网节点 q 的额定功率最大值; $P_{\text{base}}^q(t)$

为 t 时刻配网供电节点 q 的基础负荷; $P_{\text{charge}}^z(t)$ 为接入快充站 z 的满发负荷。

3) 节点重要度耦合。负荷节点在配电网中承担的路径越多, 则具有较高的节点重要度, 对线路功率传输承担枢纽作用, 若故障容易引起多条路径瘫痪, 使系统功率传输压力增大, 威胁网络可靠性。因此耦合网络中引入节点重要度指标 K_l , 表示节点 q 与节点平均度值的比值。

$$K_{l(q)} = k_q \frac{1}{b} \sum_{f=1}^b k_f \quad (4)$$

式中: k_q 为配网节点 q 的节点度, 表示与该节点有着直接连接的节点的个数; k_f 为配网节点 f 的节点度。

3.2.2 耦合关系求解策略

首先, 基于空间耦合划分初步匹配结果, 考虑现实中交通网与配电网双重地理位置交错性的特点, 选取距离每个路网节点最近的 5 个配网节点为待匹配配网节点集 Ω_{NN} 。对于具体节点的耦合方案, 需进一步考虑容量裕度与节点重要度的影响。

其次, 基于初步划分结果, 将 Ω_{NN} 内剩余目标配网节点与路网节点的匹配关系设为决策变量, 利用上述 3 个耦合原则生成 3 个耦合评估矩阵, 对耦合方案进行进一步精细化评估。

然后, 依据以下耦合原则: 两网耦合节点之间地理位置近, 避开节点重要度高的交通枢纽点, 同时节点容量裕度较大以均衡负荷接入点, 将 3 个耦合指标归一化处理, 计算路网节点 p 与配网节点 q 的匹配系数 Y_l , 如式(5)所示。

$$Y_l = \beta_1 D_{l(p,q)} - \beta_2 P_{l(p,q)} + \beta_3 K_{l(q)} \quad (5)$$

考虑 3 个指标的综合权重, 取 $\beta_1 = 0.6$ 、 $\beta_2 = 0.2$ 、 $\beta_3 = 0.2$, 因此最终路网节点 p 与配网节点 q 一对一匹配的选择模型 M_a , 如式(6)所示。

$$M_{a(p \rightarrow q)} = q \otimes \min Y_l \quad (6)$$

最后, 假设配网节点对供电分区内基础负荷以及快充站内 EV 负荷供电, 将各快充站充电负荷归算到对应的配网供电节点, 并与节点基础负荷 $P_{\text{base}}^q(t)$ 相叠加, 得到配网节点综合负荷 $P_{\text{all}}^q(t)$, 如式(7)所示。

$$P_{\text{all}}^q(t) = P_{\text{base}}^q(t) + P_{\text{charge}}^q(t) \quad (7)$$

式中, $P_{\text{charge}}^q(t)$ 为接入配网节点 q 的快充站满发负荷。

3.3 上层-快充站规划模型

3.3.1 目标函数

电动汽车快充站的规划建设不仅要考虑社会经

济效益, 也要考虑 EV 用户的充电满意度与便利程度, 具体数学描述如式(8)所示。

$$\min F_{cs} = \alpha_1(C_1 + C_2) + \alpha_2(C_3 + C_4) \quad (8)$$

式中: F_{cs} 为快充站建设总成本; C_1 、 C_2 分别为快充站建设与运行维护成本; C_3 、 C_4 分别为 EV 用户前往快充站途中年耗时成本与到达快充站等待充电的年排队时间成本; α_1 、 α_2 为快充站与用户综合成本的权重系数, 考虑快充站的社会公共服务性质, 取 $\alpha_1 = 0.8$ 、 $\alpha_2 = 1.2$ 。

1) 快充站年建设投资成本

$$C_1 = \sum_{z=1}^{N_{ETS}} \left[(AN_{mc}^2 + BN_{mc} + C) \frac{r_0(1+r_0)^T}{(1+r_0)^T - 1} \right] \quad (9)$$

式中: N_{ETS} 为快充站总数量; A 为快充站占地面积、电缆、变压器等的等效投资费用; B 为充电桩单价; C 为快充站基建费用; r_0 为贴现率; T 为充电桩运行年限。

2) 快充站年运行维护成本

快充站的运行维护费用主要包括充电桩折旧费用、检修材料费用和人工费用等, 按照初期建设投资的百分比进行取值, 具体计算见式(10)。

$$C_2 = \eta \sum_{z=1}^{N_{ETS}} (AN_{mc}^2 + BN_{mc} + C) \quad (10)$$

式中, η 为折算因子。

3) 用户充电途中年耗时成本

$$C_3 = 365C_w \sum_e \sum_z \omega_e y_{ez} t_{ez} \quad (11)$$

式中: C_w 为用户单位出行时间成本; t_{ez} 为 EV 用户由快充需求节点 e 到达快充站 z 的时间; ω_e 为充电需求节点 e 处快充需求车辆数; y_{ez} 为由充电需求节点 e 选择到快充站 z 充电的 EV 比例, 根据最短路径算法, 若两点之间的直线为最短路径, y_{ez} 取 1, 否则取 0。

4) 用户年排队等待时间成本

由用户排队等待时间期望值得到 EV 用户充电年排队等候时间成本, 如式(12)所示。

$$C_4 = 365C_w \sum_z (W_{qz} \sum_e \omega_e y_{ez}) \quad (12)$$

3.3.2 约束条件

相关约束条件包括: 充电桩数量、排队等候时间以及快充站距离约束, 详细公式见文献[20]。

3.4 下层-配网拓展规划模型

3.4.1 目标函数

配网规划目标是改造投资成本 C_{Dinv} 与运行维护成本 C_{Dope} 之和最小, 如式(13)所示。

$$\min F_D = C_{Dinv} + C_{Dope} \quad (13)$$

式中, F_D 为配网扩展总成本。

$$C_{Dinv} = \beta_L \sum_{ij \in \Omega^L} x_{ij} C_{ij}^L l_{ij} + \beta_m \left(\sum_{m \in \Omega^{lc}} x_m^{lc} C_m^{lc} + \sum_{m \in \Omega^{te}} x_m^{te} C_m^{te} \right) \quad (14)$$

式中: Ω^L 、 Ω^{lc} 、 Ω^{te} 分别为可新建线路、可扩容变电站以及可新建变电站集合; C_{ij}^L 、 C_m^{lc} 、 C_m^{te} 分别为配电线路 ij 的单位新建成本、变电站 m 的扩容与新建成本; l_{ij} 为配电线路 ij 长度; x_{ij} 、 x_m^{lc} 、 x_m^{te} 为二进制决策变量, 分别代表配电线路是否新建、变电站是否扩容或新建; β_L 、 β_m 为配电线路与变电站 m 的资金回收系数, 取值参考文献[2]。

配网规划的运行维护成本同样引入折算因子 η_D , 按照初期投资的百分比进行取值, 如式(15)所示。

$$C_{Dope} = \eta_D \left(\sum_{ij \in \Omega^L} x_{ij} C_{ij}^L l_{ij} + \sum_{m \in \Omega^{lc}} x_m^{lc} C_m^{lc} + \sum_{m \in \Omega^{te}} x_m^{te} C_m^{te} \right) \quad (15)$$

3.4.2 约束条件

1) 线路传输功率约束

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq (x_{ij} \bar{S}_{ij})^2 \quad \forall ij \in \Omega^L \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_{ij} = x_{ij} [U_i^2 g_{ij} - U_i U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij})] \\ Q_{ij} = x_{ij} [-U_i^2 b_{ij} - U_i U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij})] \end{cases} \quad \forall ij \in \Omega^{LD} \quad (17)$$

式中: P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为线路 ij 传输的有功功率、无功功率; \bar{S}_{ij} 为线路 ij 的视在功率容量; g_{ij} 、 b_{ij} 分别为线路 ij 的电导和电纳; U_i 、 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值; θ_{ij} 为线路 ij 两端相角差; Ω^{LD} 为配电线路集合。

2) 线路端电压约束

参考文献[21]采用 Big-M 法, 引入惩罚项 M 得到带有二进制决策变量的不等式约束式(18)和式(19)。

$$Z_c^{Lf} f_c^{Lf} + [(S^{Lf})_{row,c}]^T U_s \leq M(1 - x_{ij}), \forall c \in \Omega^{Lf} \quad (18)$$

$$Z_d^{Lc} f_d^{Lc} + [(S^{Lc})_{row,d}]^T U_s \leq M(1 - x_{ij}), \forall d \in \Omega^{Lc} \quad (19)$$

式中: Z_c^{Lf} 、 Z_d^{Lc} 分别为固定线路 c 与新建线路 d 的阻抗; f_c^{Lf} 、 f_d^{Lc} 均为通过固定与新建线路的电流幅值; $(S^{Lf})_{row,c}$ 、 $(S^{Lc})_{row,d}$ 分别为固定与新建线路组成网络的节点支路矩阵 S 中线路 c 、 d 的相关列; U_s 为节点电压列向量; Ω^{Lf} 、 Ω^{Lc} 分别为固定线路集合和新建线路集合。以式(19)为例进行说明, 若新建变量 x_{ij} 为 1, 则等价于等式约束; 若 x_{ij} 为 0, 不等式右项无限大, 不等式恒成立, 相当于没有约束。

3) 节点电压约束

$$U_q^{\min} \leq U_q \leq U_q^{\max} \quad (20)$$

式中, U_q^{\max} 、 U_q^{\min} 为节点 q 电压幅值上、下限。

4) 变电站容量约束

$$\begin{cases} (P_m^S)^2 + (Q_m^S)^2 \leq (x_m^{\text{tc}} \bar{S}_m^{\text{tc}} + x_m^{\text{nc}} \bar{S}_m^{\text{nc}})^2 \\ \forall m \in [\Omega^{\text{tc}} \cup \Omega^{\text{nc}}] \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_m^S 、 Q_m^S 分别为变电站 m 输出的有功功率和无功率; \bar{S}_m^{tc} 、 \bar{S}_m^{nc} 分别为可扩容、可新建变电站的视在功率容量。针对可扩容的现有变电站, \bar{S}_m^{tc} 设置为 0; 针对可新建的候选变电站, \bar{S}_m^{nc} 设置为 0。

5) 网络辐射状约束

已有或扩容改造的配电系统均需要满足网络辐射状, 具体公式见文献[2]。

3.5 求解策略

本文提出的联合规划模型为双层求解模型, 上层为 EV 快充站规划, 选用具有较强收敛性的遗传算法进行求解; 下层模型存在较多决策变量, 选用混合整数线性规划求解方法, 调用 Matlab 软件中 Gurobi 求解器进行求解。

具体求解流程如图 5 所示。

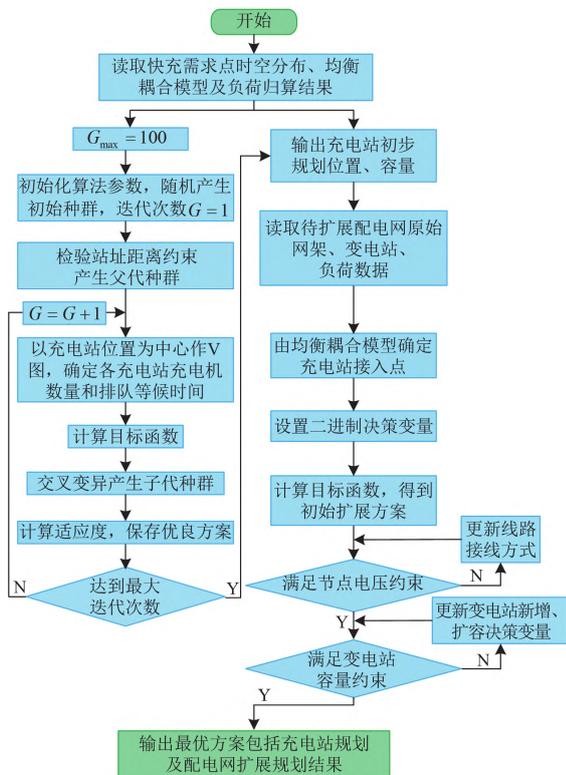


图 5 电动汽车快充站与配电网联合规划模型求解流程

Fig. 5 Solution process of joint planning model of EV charging station and distribution network

1) 读取 EV 快充需求时空分布, 由均衡耦合模型得到充电负荷归算配网节点的对应关系。

2) 设置最大迭代次数 $G_{\max} = 100$, 初始化种群, 令迭代次数 $G = 1$, 随机产生不同快充站的位置与充电机配置数量。由站址间距离约束产生父代种群, 经交叉、变异产生子代种群; 通过计算适应度保留优良方案, 在满足最大迭代次数后得到不同数量快充站下的初步规划位置、容量, 计算综合成本后决定初步快充站数量、容量及位置。

3) 读取待扩展配电网的原始网架及基础负荷数据, 并叠加基础负荷得到配网各节点的综合负荷; 设置二进制决策变量, 包括线路新建、变电站扩容或新建, 计算配网扩展成本并检验配网节点电压及快充站容量是否超限, 进而进行方案更新, 最终输出快充站与配电网的最优规划方案。

4 算例分析

4.1 测试系统

选用 54 节点配电网[22]与 2.2.1 节构建的 36 节点路网, 对双层规划模型的可行性进行验证。54 节点配电网初始结构如图 6 所示。

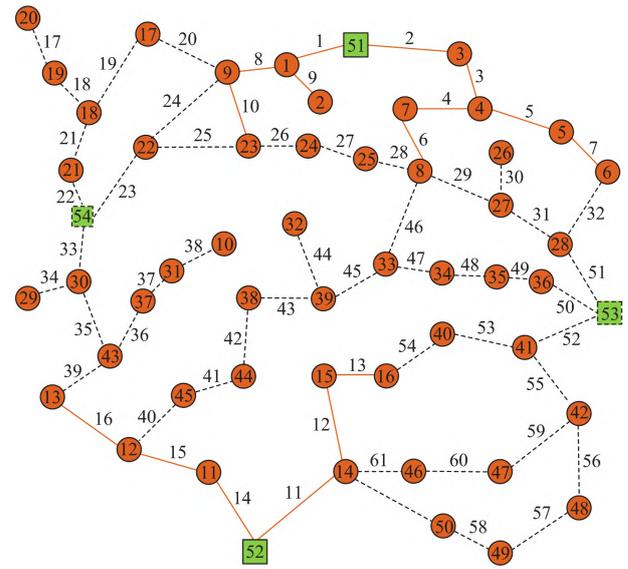


图 6 54 节点配电网初始结构

Fig. 6 Initial structure of 54-node distribution network

待扩展配电网共包含 16 条固定线路与 45 条可新建线路, 2 个已有变电站(可扩容)和 2 个待建变电站, 其中实线代表已有设施, 虚线表示可新建设施, 线路单位新建成本为 25 030 元/km。

4.2 EV 充电需求时空分布

4.2.1 参数设置

1) 车辆信息

以目前电动汽车市场占比较多的车型为例, 通勤私家车选择北汽 E150, 电池容量为 25.6 kWh; 出租车选择比亚迪 E6, 电池容量为 60 kWh。

本次数据是以网约车出行数据为载体, 而网约车通常为私家车和出租车。根据《2022 年中国网约车市场发展报告》统计, 全国网约车行业公户车辆与私户车辆的占比情况为 21.56%、78.44%。据统计, 目前成都市电动汽车保有量为 26.5 万辆, 考虑每日发生出行行为的车辆占比、车型占比以及所选中心城区面积, 假设研究区域内 EV 保有量为 4000 辆。私家车主要以居民通勤上班为主, 主要往返于居民区与工业区之间, 而出租车主要以营运为主, 活动范围不限, 故假设私家车车辆仅以居民区作为始发地, 不同始发地的电动汽车数量如表 2 所示。

表 2 不同始发地的电动汽车数量

Table 2 Number of electric vehicles in different regions

功能区	私家车/辆	出租车/辆
居民区	3200	300
商业区	—	100
公共服务区	—	100
工作区	—	300
总计	3200	800

2) 充电信息

假设充电需求节点均于路网节点产生, 假设 EV 均采用快充方式进行补电, 充电功率为 60 kW。

3) 路网信息

以图 2 所示的区域为例, 区域面积共 25 km², 主干路网包括 36 个主节点以及 58 条道路。路网节点经纬度坐标如表 A1 所示, 道路长度由经纬度差计算得到, 但由于实际道路存在一定曲折, 因此仿真时将道路长度乘以曲折系数 1.15。

4.2.2 充电需求时空分布

首先分别预测在工作日和休息日情况下, 24 h 内成都市中心城区各节点电动汽车快充需求时空分布情况, 如图 7 所示, 不同功能分区快充负荷分布见图 A4。

由图 7 可知, 工作日充电高峰集中于 17:00 与 20:00—24:00 时段, 此时大部分城市居民结束一日出行进行补电; 在 06:00—09:00 时段充电需求较低, 充电行为较少; 休息日整体充电需求会高于工作日。从空间上看, 路网节点 15、24、35、32 处快充需求较高, 这是由于此 4 处位于城区中心位置, 交通较密集, 从订单出发量与到达量的规律也可看出, 此 4 处充电需求较高。

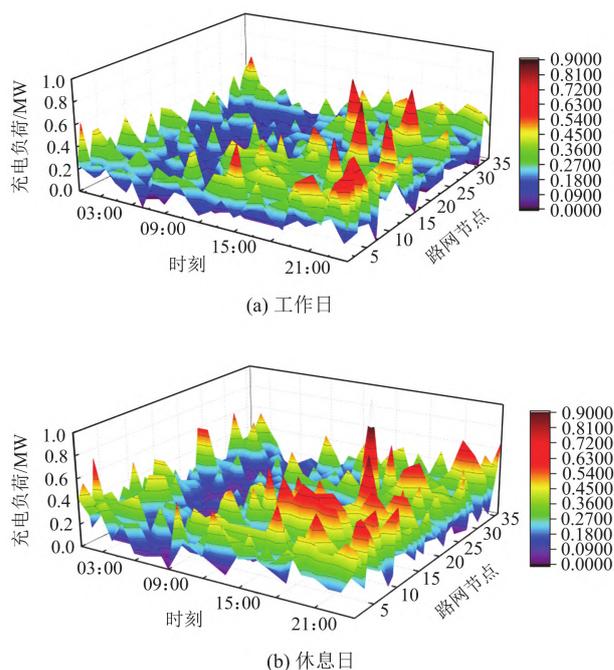


图 7 工作日/休息日 EV 充电需求时空分布

Fig. 7 Temporal and spatial distribution of EV charging demand during working days and weekend

4.3 快充站规划结果

由于 EV 充电需求具有实时变化性与空间差异性, 无法以固定值代表同一路网中所有时刻的 EV 快充需求。因此针对 4.2 节 EV 充电需求的预测结果, 选取负荷最大时刻 20:00 的各个路网节点 EV 快充负荷作为快充站规划的输入量进行计算。

1) 数量优化

快充站优化相关参数设置见表 A2, 对应不同快充站数量的社会年综合成本如图 8 所示。

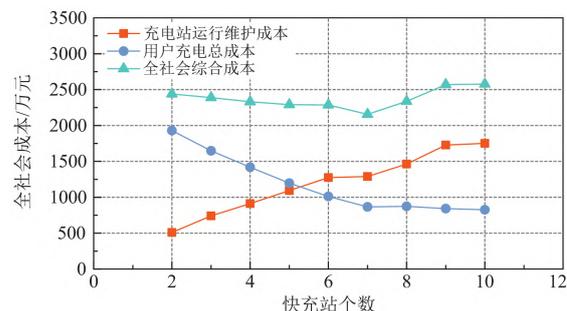


图 8 快充站年综合成本曲线

Fig. 8 Annual comprehensive cost curve of charging station

由图 8 可以看出, 随着快充站数量的增加, 其建设、运维成本也随之增加, 然而用户充电总成本逐步降低, 因此年综合成本呈现先降低后增加的趋势, 均衡投资经济性与用户充电便利满意度之后,

在快充站数量为 7 时，年综合成本达到最低，为 2155.93 万元。

2) 位置与容量配置

快充站最终选址方案如图 9 所示。

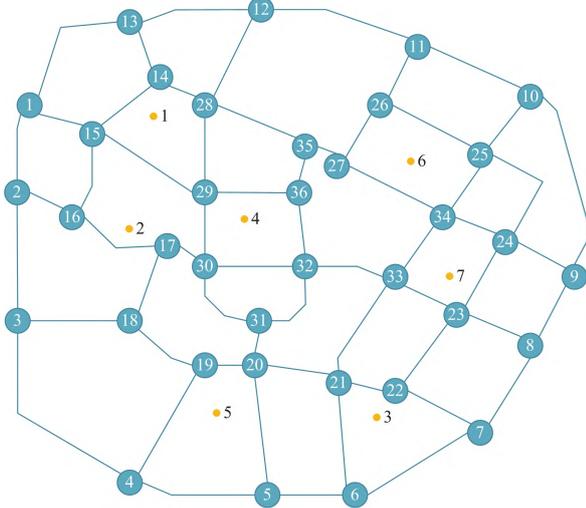


图 9 快充站建站方案

Fig. 9 Fast charging station construction scheme

由图 9 可以看出，对应于 15、24、32、35 多处较高 EV 充电需求分布的情况，快充站建站地址也大多集中在附近区域，最大限度地满足了 EV 快充需求的同时减少用户由充电需求点前往快充站的时间成本，而中心城区外围交通较稀疏且快充需求较低的区域，快充站安置较少，但仍处于有效服务范围内，具有较高的实际意义。

各快充站内具体容量配置如表 3 所示。

表 3 快充站位置及充电机配置方案

Table 3 Fast charging station location and charging machine configuration scheme

快充站编号	1	2	3	4	5	6	7
充电机配置数量/个	21	11	12	17	25	23	19
快充站功率/MW	1.26	0.66	0.72	1.02	1.5	1.38	1.14

4.4 节点耦合结果

设置两个场景以验证耦合模型的有效性。

1) 场景一：仅将地理位置最优作为快充站接入配网的原则，基于 4.3 节得到的快充站位置寻找其最近的路网节点，并通过空间耦合关系得到对应配网节点。

2) 场景二：基于交通-电力均衡耦合模型，考虑空间位置、容量裕度以及节点重要度进行交通-电力网络节点耦合，继而进行电动汽车快充站与配网的联合规划。

由于耦合过程指标维度较大，因此交通-电力网络节点单一空间及综合耦合指标与其节点对应关系见表 A3 所示，提取出 7 个目标快充站与路网、配网二者具体的耦合关系，其对比如表 4 所示。

表 4 节点耦合方案对比

Table 4 Comparison of node coupling schemes

快充站	对应路网节点	场景一对应配网节点	场景二对应配网节点
1	14	22	22
2	17	10	37
3	22	16	14
4	36	32	39
5	19	44	44
6	25	27	8
7	23	40	41

可以看出，由于空间耦合原则在耦合指标中所占的权重设置较大，最终两种方案之间部分节点耦合关系是一致的。而考虑容量裕度及节点重要度则改变了部分耦合对应关系，但仍遵循空间最优，为后续配网规划提供了较为科学的节点耦合方案。

4.5 配网拓展规划结果

配网具体扩展数据见表 A4，最终规划结果及对比如表 5 与图 10 所示。

由表 5 可以看出，由于快充站 2、3、4、6、7 的接入方案存在差别，导致两种场景下变电站、线路的投建方案存在差异。场景二下配网扩展方案的经济性虽有所提升，但相差不大，仅提升 3.14%，这是由于耦合模型的存在是为联合规划模型提供更合理的节点耦合方式，而模型的负荷总输入量是一致的，因此在规划成本上的差异较小。

表 5 最终规划结果

Table 5 Final planning result

项目	规划结果(场景一)	规划结果(场景二)	
配电网	固定馈线	1 2 3 4 5 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 21 22 25 26 27 30 31 33 34 36 37 38 39 40 41	1 2 3 4 5 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 21 22 25 26 28 30 31 33 34 35 36 37 38 40 42 44 45 47
	新建馈线	42 44 45 46 47 48 49 51 52 54 56 57 58 59 60 61	48 49 50 51 52 53 55 56 57 58 59 60
	变电站	51:[16.7] 52:[16.7] 53:[22.2] 54:[22.2]	51:[16.7] 52:[16.7] 53:[22.2] 54:[22.2]
	配变容量/MVA		
	快充站规划节点	22、10、16、32、 44、27、40	22、37、14、39、44、 8、41
	成本	总成本/ 万元	
		3888.22	3766.26

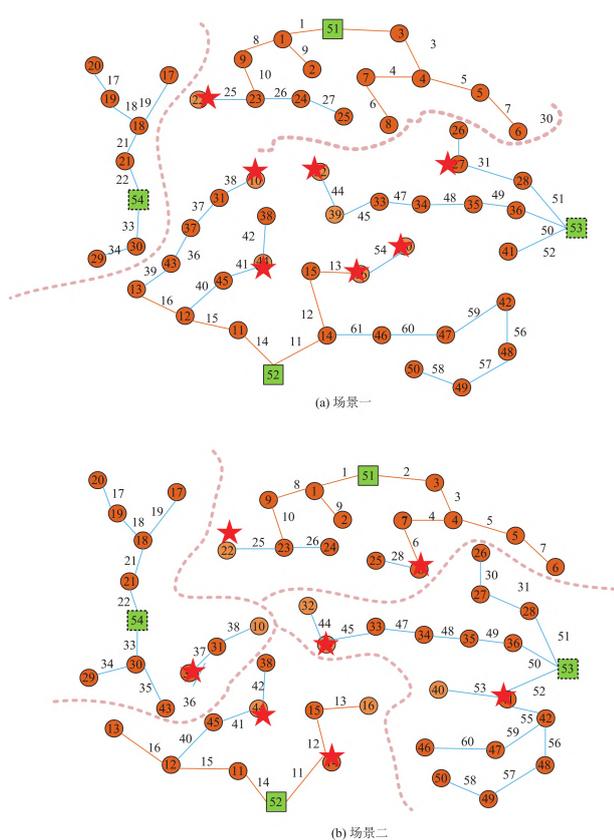


图 10 电动汽车快充站及配网扩展规划结果

Fig. 10 EV fast charging station and distribution network expansion planning results

下面将从配网运行的安全性与可靠性角度进行分析。

1) 配网分区及负载率对比

规划后配网内变电站负荷分区结果对比如表 6 所示。

表 6 配网分区结果对比

Table 6 Comparison of distribution zone results

变压器	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
场景一	13+1	20+4	10+2	7+0
场景二	13+2	11+2	15+2	11+1

由图 10 和表 6 可以看出, 由于相较目标路网, 54 节点配网区域较大, 场景一中仅考虑空间耦合, 快充站规划较集中, 造成变电站 52 承载负荷较大, 共有 20 个负荷节点与 4 个快充站, 而新建变电站 54 仅承担 7 个负荷节点, 负荷资源分布不均衡。考虑交通-电力均衡耦合模型后, 场景二下 4 个固定变电站与新建变电站分区较均衡且 7 个快充站均匀接入 4 个变电站分区, 均衡了配网用电情况, 使配网分区更为合理。

截至 2022 年 8 月, 成都市新能源汽车渗透率为

35%^[23], 为进一步验证模型的有效性, 并考虑未来大规模高渗透率电动汽车发展对路网拥堵的压力以及城市基础用电负荷增长的需求, 将对应场景一、二的新能源汽车渗透率提升至 60%, 基础负荷也提升 40%, 考虑到耦合模型主要在配网分区平衡方面的有效性, 因此将 4 种场景规划结果下的变压器负载率进行比较, 如表 7 所示, 场景三、四的其他规划结果见图 A5。

表 7 变压器负载率对比

Table 7 Comparison of transformer load ratio

变压器	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
场景一	30.31	53.97	21.17	14.9
场景二	31.44	31.28	28.71	23.26
场景三	47.18	61.2	70.8	54.55
场景四	54.31	58.14	59.5	60.9

对比表 7 中的场景一、三可以看出, 伴随电动汽车数量的增长, 将不可避免导致路网中道路流量以及负荷需求的增长, 增加了分区内配变载荷量, 使负载率明显增长并呈现过载现象。

场景一下的变压器 S₂ 由于分区内新建线路较多, 如 36~42, 56~61, 加之已存在的固定线路以及负担 4 个 EV 大型快充站, 导致负载率为 53.97%, 而配网内变压器 S₄ 负载率较小, 仅为 14.9%, 分区之间负载率相差为 39.07%, 分区极度不均衡, 造成了配变资源的浪费。负荷增加后, 网络规划的建设方案产生改变, 此时场景三下的变压器 S₃ 负载率高达 70.8%, 造成配变过载, 威胁网络安全运行; 而场景四考虑节点均衡耦合后, 各变压器之间负载率差最大仅为 6.59%, 验证了交通-电力耦合模型在平衡配网分区方面的有效性。

2) 节点电压对比

场景一、二的配网所有节点电压如图 11 所示。

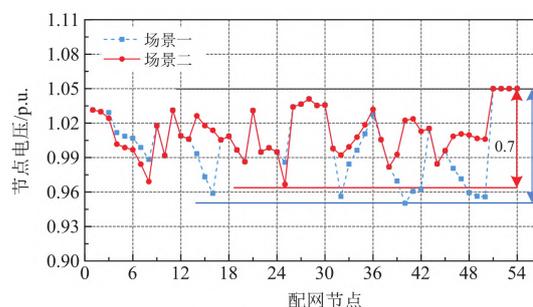


图 11 节点电压对比

Fig. 11 Node voltage comparison

由图 11 可以看出, 两种场景的联合规划方案中配网各节点电压均处于 0.95~1.05 p.u. 之间, 接入 EV

快充站后，配网的安全性与可靠性均未受到威胁，验证了 EV 快充站与配网联合规划模型的有效性。而综合容量与地理双重维度的耦合关系后，场景二的电压降落为 0.7 p.u.，相较于场景一更低，配网运行更具安全性，验证了耦合方式的有效性。

5 结论

本文提出了一种基于交通-电力均衡耦合模型的电动汽车快充站与配电网双层联合规划方法，并以成都市中心城区实际路网和 54 节点配电网为例，验证了所提模型的可行性。仿真结果表明：

1) 通过对网约车行驶数据的挖掘，可以得到更符合城市居民出行特性的出行规律，动态模拟快充需求时空分布情况，得到工作日充电高峰集中于 17:00 与 20:00—24:00 时段的结论，为快充站规划模型提供实际应用价值。

2) 考虑配电网容量存在上限，EV 快充负荷的增加使变压器承载过重，将配电网容量限制与扩展成本计入 EV 快充站与配电网联合规划模型中，可以减小 EV 接入对配电系统的压力，对实际电动汽车快充站与配网的升级拓展有一定指导意义。

3) 在负荷增量的前提下，在快充负荷占比达到 34.7%后，将配网进行扩展，同时通过交通-电力均衡耦合模型的构建，多角度考虑地理、容量以及节点重要度，可提供更加合理的 EV 快充负荷接入方式，使配网分区均衡化，分区之间负载率差由 39.07%降至 8.18%，相较于电动汽车随机接入的方案，提高了配网的安全性。

未来，伴随电动汽车渗透率机快速充电需求的增加，整车换电这种便捷、高效的补电方式将成为电动汽车补电的重要方式，后续将针对电动汽车光充储一体站规划进行深入研究，进一步发挥电动汽车作为储能元件的优势。

附录 A

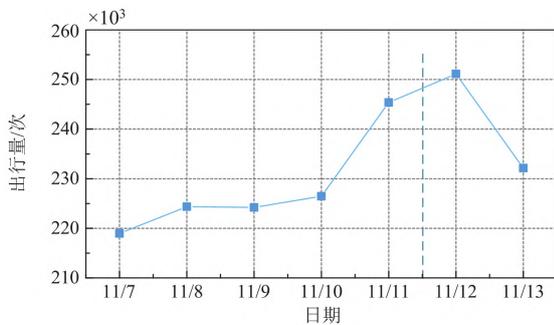


图 A1 EV 出行量统计图

Fig. A1 EV travel statistics chart

From	To	H	W	P	B	From	To	H	W	P	B
H	H	0.1626	0.3803	0.1996	0.3296	H	H	0.3542	0.1597	0.2531	0.233
H	W	0.1802	0.312	0.2215	0.2863	H	W	0.3249	0.1493	0.2602	0.2656
H	P	0.1248	0.3101	0.2477	0.3174	H	P	0.3124	0.1283	0.2363	0.323
H	B	0.1552	0.3218	0.2644	0.2586	H	B	0.3148	0.1848	0.2551	0.2453
W	H					W	H				
W	W					W	W				
W	P					W	P				
W	B					W	B				
P	H					P	H				
P	W					P	W				
P	P					P	P				
P	B					P	B				
B	H					B	H				
B	W					B	W				
B	P					B	P				
B	B					B	B				

(a) 09:00 转移概率

(b) 17:00 转移概率

图 A2 典型时刻功能区区间车辆转移概率图

Fig. A2 Probability diagram of vehicle transfer in functional areas at typical time

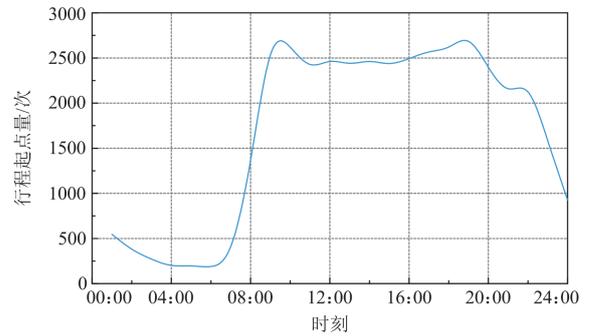


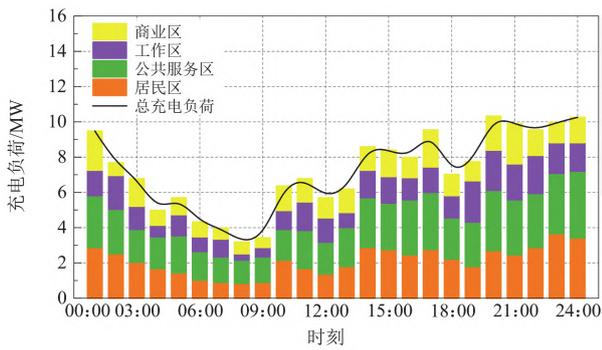
图 A3 出行起点时间分布图

Fig. A3 Travel start time distribution diagram

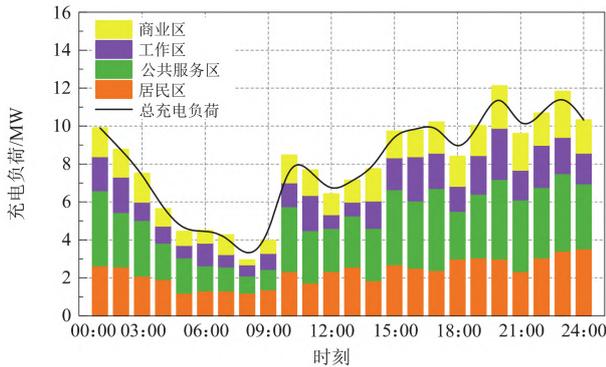
表 A1 路网节点经纬度

Table A1 Latitude and longitude of road network nodes

节点	经度	纬度	节点	经度	纬度
1	104.041 131	30.676 279	19	104.060 872	30.647 559
2	104.040 444	30.666 46	20	104.066 279	30.647 337
3	104.040 873	30.651 915	21	104.074 777	30.646 082
4	104.052 117	30.634 488	22	104.080 871	30.644 014
5	104.066 537	30.633 528	23	104.087 737	30.653 613
6	104.076 064	30.633 749	24	104.092 029	30.661 366
7	104.089 883	30.640 248	25	104.089 282	30.669 266
8	104.095 977	30.649 626	26	104.078 467	30.675 614
9	104.100 526	30.657 231	27	104.073 918	30.669 709
10	104.094 947	30.676 574	28	104.060 357	30.675 688
11	104.083 102	30.682 406	29	104.060 529	30.666 829
12	104.066 108	30.685 653	30	104.060 786	30.658 265
13	104.052 375	30.684 103	31	104.066 108	30.652 506
14	104.057 525	30.677 312	32	104.071 086	30.658 413
15	104.048 169	30.672 44	33	104.081 214	30.656 493
16	104.045 766	30.663 433	34	104.085 763	30.663 95
17	104.056 151	30.660 259	35	104.071	30.670 89
18	104.052 375	30.653 097	36	104.070 571	30.666 977



(a) 工作日



(b) 休息日

图 A4 工作日/休息日不同功能分区的充电负荷分布

Fig. A4 Charging load distribution in different functional zones during working days and weekend

表 A2 联合规划相关参数

Table A2 Parameters related to charging station planning

参数	数值
A /万元	1
B /(万元/台)	10
C /万元	100
r_0	0.08
T /年	20
η %	10
C_w /元	18

表 A3 配网扩展规划相关参数

Table A3 Parameters related to network expansion planning

候选变压器	S_1	S_2	S_3	S_4
初始容量/MVA	16.7	16.7	—	—
可扩容量/MVA	16.7	13.3	—	—
新增容量/MVA	—	—	22.2	22.2
扩建/新建成本/万元	10	8	20	20

表 A4 交通-电力网络节点耦合指标及对应关系

Table A4 Node coupling index and corresponding relation of traffic-power network

路网节点	单一空间指标	单一耦合配网节点	综合归一化指标	均衡耦合配网节点
1	0.058 840	21	-0.066 42	21
2	0.109 425	30	-0.021 69	21
3	0.076 459	13	-0.026 42	29
4	0.092 424	12	0.034 325	12
5	0.068 108	11	0.007 037	11
6	0.105 024	14	0.007 698	14
7	0.034 479	46	-0.047 68	46
8	0.073 600	40	-0.000 1	41
9	0.065 914	41	-0.017 25	41
10	0.057 150	26	-0.014 12	26
11	0.067 339	7	-0.041 63	2
12	0.007 426	9	-0.045 65	9
13	0.083 176	18	0.026 648	17
14	0.043 231	22	-0.029 36	22
15	0.024 754	21	-0.021 81	21
16	0.049 755	30	-0.053 58	30
17	0.031 312	10	-0.053 14	37
18	0.031 312	43	-0.069 48	43
19	0.018 021	44	-0.063 96	44
20	0.040 976	44	-0.068 02	44
21	0.068 288	15	-0.039 87	44
22	0.049 509	16	-0.027 56	14
23	0.055 352	40	0.002 343	41
24	0.020 413	34	-0.021 4	34
25	0.061 886	27	-0.016 15	8
26	0.038 746	24	-0.036 12	2
27	0.025 844	32	-0.093 38	32
28	0.059 873	22	-0.0543 5	23
29	0.070 016	31	-0.017 37	10
30	0.059 616	37	-0.038 29	37
31	0.064 977	44	-0.050 02	44
32	0.044 832	38	-0.035 13	23
33	0.046 509	39	-0.083 47	39
34	0	33	-0.082 52	33
35	0.058 001	32	-0.075 65	32
36	0.044 558	32	-0.092 11	39

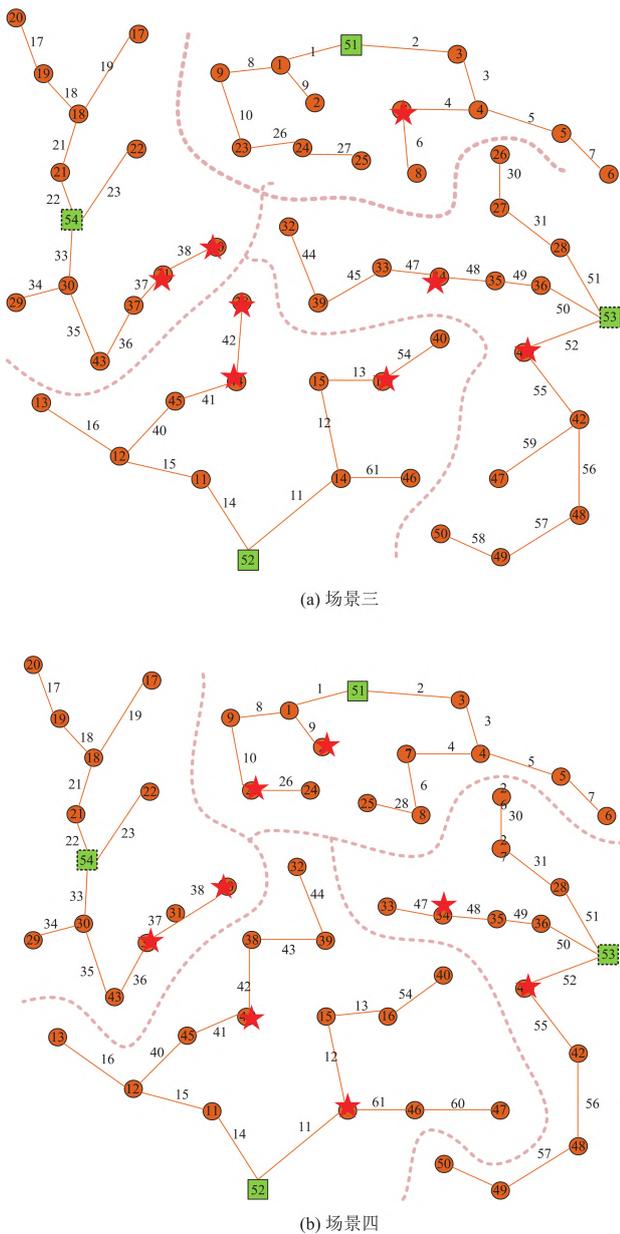


图 A5 场景三、四快充站及配网规划结果对比

Fig. A5 Fast charging station of scenario 3 and 4 and comparison of distribution network planning result

参考文献

[1] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 801-813.

[2] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 配电系统与电动汽车充电网络的协调规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 10-18.

YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al.

Coordinated planning for power distribution system and electric vehicle charging infrastructures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 10-18.

[3] 周衍涛, 戴军, 苑惠丽, 等. 城市电动汽车充电设施需求预测与规划布局研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 177-187.

ZHOU Yantao, DAI Jun, FAN Huili, et al. Demand forecasting and planning layout of urban electric vehicle charging facilities[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 177-187.

[4] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 城区电动汽车充电站布局规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 181-187.

HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Layout planning of electric vehicle charging stations in urban areas[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 181-187.

[5] 张艺涵, 徐菁, 李秋燕, 等. 基于密度峰值聚类的电动汽车充电站选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 132-139.

ZHANG Yihan, XU Jing, LI Qiuyan, et al. An electric vehicle charging station siting and sizing method based on a density peaks clustering algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 132-139.

[6] 李飞, 梁宝全, 张旭东, 等. 面向电动汽车快充站服务效率的自适应动态激励机制[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 48-55.

LI Fei, LIANG Baoquan, ZHANG Xudong, et al. Adaptive dynamic incentive mechanism for service efficiency of EV fast charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 48-55.

[7] 侯慧, 王逸凡, 黄亮, 等. 满足电动汽车快充需求的含储能复合型充电站充电优化策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 65-71.

HOU Hui, WANG Yifan, HUANG Liang, et al. Charging optimization strategy of composite charging station with energy storage to meet fast charging demand of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 65-71.

[8] ARIAS M B, BAE S. Electric vehicle charging demand forecasting model based on big data technologies[J]. Applied Energy, 2016, 183: 327-339.

[9] 王睿, 高欣, 李军良, 等. 基于聚类分析的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 37-44.

WANG Rui, GAO Xin, LI Junliang, et al. Electric vehicle charging demand forecasting method based on clustering analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 37-44.

[10] 田梦瑶, 汤波, 杨秀, 等. 综合考虑充电需求和配电网接纳能力的电动汽车充电站规划[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 498-509.

- TIAN Mengyao, TANG Bo, YANG Xiu, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering charging demands and acceptance capacity of distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 498-509.
- [11] 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, et al. 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.
- [12] 李宏仲, 张伟, 高宇男, 等. 考虑用户出行特性和配电网线路可用裕度的充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 48-56.
- LI Hongzhong, QIANG Wei, GAO Yunan, et al. Charging station planning considering users' travel characteristics and line availability margin of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 48-56.
- [13] 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.
- [14] 刘畅, 刘洪, 李香龙, 等. 考虑路网与配电网可靠性的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 28-34.
- LIU Chang, LIU Hong, LI Xianglong, et al. Multi-objective EV charging station planning with consideration of road network reliability and distribution network reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 28-34.
- [15] 张美霞, 徐立成, 杨秀, 等. 基于电动汽车充电需求时空分布特性的充电站规划研究[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 256-268.
- ZHANG Meixia, XU Licheng, YANG Xiu, et al. Planning of charging stations based on spatial and temporal distribution characteristics of electric vehicle charging demand[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 256-268.
- [16] 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.
- SHAO Yinchi, MU Yunfei, YU Xiaodan, et al. A spatial temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5207-5219.
- [17] 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: Southeast University, 2004.
- [18] 王露. 城市纯电动汽车快速充电设施的布局选址优化模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- WANG Lu. Research on layout location optimization of fast charging facilities for urban pure electric vehicles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [19] 刘俊勇, 向月, 姚昊天, 等. 三网融合下充电服务网规划与运营探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 1-12.
- LIU Junyong, XIANG Yue, YAO Haotian, et al. Discussion on planning and operation of charging service network integrated with power and transportation networks[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 1-12.
- [20] 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 Xin, FENG Yongtao, XIONG Hu, et al. Electric vehicle charging station planning based on travel probability matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 272-281.
- [21] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42.
- DU Aihu, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 35-42.
- [22] MIRANDA V, RANITO J V, PROENCA L M. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(4): 1927-1933.
- [23] 刘泰山. 前 8 月成都新能源汽车推广量突破 10 万辆同比增长 117%[EB/OL]. 成都日报(3)[2022-09-19]. http://www.dlhb.net/dlhb/ch/common_item.aspx?parent_id=20180808011340207&menu_id=20180813022925209.
-
- 收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2023-01-01
- 作者简介:
- 张美霞(1979—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统优化运行、电动汽车与电网互动; E-mail: zmx19790612@sina.com
- 张倩倩(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车充电站及配网规划; E-mail: qqwy0329@126.com
- 杨秀(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电与微电网的运行与仿真。E-mail: yangxiu721102@126.com
- (编辑 姜新丽)