



基于山地城市电动汽车负荷特性的充电设施规划

龙虹毓 周游 陈芳幸 胡晓锐 徐婷婷 龙羿

Charging Facility Planning Based on Load Characteristics of Electric Vehicles in Mountain Cities

LONG Hongyu, ZHOU You, CHEN Fangxing, HU Xiaorui, XU Tingting, LONG Yi

引用本文:

龙虹毓, 周游, 陈芳幸, 等. 基于山地城市电动汽车负荷特性的充电设施规划[J]. 现代电力, 2024, 41(2): 371–379. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0195

LONG Hongyu, ZHOU You, CHEN Fangxing, et al. Charging Facility Planning Based on Load Characteristics of Electric Vehicles in Mountain Cities[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(2): 371–379. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0195

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0195>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

城市EV时空充电负荷预测及充电站规划研究

Research on Spatio-temporal Charging Load Prediction and Charging Station Planning of Urban Electrical Vehicles
现代电力. 2023, 40(2): 239–248 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0251>

基于SAE-ELM的电动汽车充电站负荷预测模型

Model of Load Forecasting of Electric Vehicle Charging Station Based on SAE-ELM
现代电力. 2019, 36(6): 9–15 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I6/9>

基于动态能耗模型与用户心理的电动汽车充电负荷预测

Electric Vehicle Charging Load Prediction Based on Dynamic Energy Consumption Model and User Psychology
现代电力. 2022, 39(6): 710–719 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0196>

考虑充电站需求特性的电动汽车充电站与配电网联合规划方法

Joint Planning of Distribution Network with Electric Vehicle Charging Station Considering the Demand Characteristics of Charging Stations
现代电力. 2020, 37(5): 491–500 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0063>

基于一致性K均值聚类的电动汽车充电负荷建模方法

A Modeling Method for Electric Vehicle Charging Load Based on Consensus K-means Clustering
现代电力. 2022, 39(3): 338–346 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0107>

考虑V2G模式的电动汽车充电站规划

Planning of Electric Vehicle Charging Station Considering V2G Model
现代电力. 2019, 36(1): 71–78 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I1/71>

基于山地城市电动汽车负荷特性的充电设施规划

龙虹毓¹, 周游¹, 陈芳幸¹, 胡晓锐², 徐婷婷², 龙羿²

(1. 重庆市复杂系统与仿生控制重点实验室(重庆邮电大学), 重庆市南岸区400065; 2. 国网重庆市电力公司营销服务中心, 重庆市渝北区401123)

Charging Facility Planning Based on Load Characteristics of Electric Vehicles in Mountain Cities

LONG Hongyu¹, ZHOU You¹, CHEN Fangxing¹, HU Xiaorui², XU Tingting², LONG Yi²

(1. Chongqing Key Laboratory of Complex Systems and Bionic Control(Chongqing University of Posts and Telecommunications), Nanan District, Chongqing 400065, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company Marketing Service Center, Yubei District, Chongqing 401123, China)

摘要: 针对山地城市电动汽车充电站的规划需求, 研究了山地城市道路特性, 改进了充电负荷预测与充电站规划方法, 主要包括: 研究了山地城市道路空间特性, 建立了电动汽车单车耗电模型; 分析了山地城市单车耗电特性对充电负荷时空分布的影响, 结合改进 Floyd 最短路径算法建立了群体充电负荷预测模型; 考虑了充电负荷时空分布受充电站选址的影响, 提出负荷预测与充电站规划迭代计算方法; 以充电负荷时间维度波动更小与空间分布更均衡为目标, 提出了新型山地城市充电站规划方法。通过遗传算法 Matlab 仿真求解表明, 上述建模方法能够实现对山地城市充电站的更合理规划: 一方面, 显著降低电动汽车充电负荷波动; 另一方面, 使得各站充电负荷更加均衡。

关键词: 山地城市; 单车耗电模型; 负荷预测; 充电站规划

Abstract: In order to meet the needs of planning electric vehicle charging stations in mountainous cities, the characteristics of roads in mountainous cities are studied in this paper to improve the methods charging load forecasting and charging station planning. The main contributions of this study are as follows. Firstly, the spatial characteristics of roads in mountainous cities were explored, and a single-vehicle power consumption model was established for electric vehicles. Secondly, an analysis was conducted as to the impact caused by the power

consumption characteristics of single vehicles in mountainous cities on the temporal and spatial distributions of charging load. Also, the improved Floyd shortest path algorithm was applied to establish a group charging load prediction model. Thirdly, an iterative calculation method is developed for load forecasting and charging station planning by taking into account the influence exerted by the temporal and spatial distributions of charging load on the location of charging stations. Lastly, a novel model of charging station planning in mountainous cities is proposed to reduce the temporal fluctuation of charging load and further balance its spatial distribution. According to the solution obtained through genetic algorithm MATLAB simulation, the above modeling method is capable to achieve a more reasonable planning of charging stations in mountainous cities. On the one hand, it significantly reduces the fluctuation of charging load for electric vehicles. On the other hand, it makes the charging load more balanced between different charging stations.

Keywords: mountainous city; single-vehicle power consumption model; charging load forecasting; charging station planning

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0195

0 引言

电动汽车是服务“碳达峰、碳中和”的重要手段, 正在规模化接入我国配电网, 成为新型电力系统的重要负荷^[1]。我国众多城市具有山地丘陵地形特征^[2], “坡度”、“海拔差”等因素导致电动汽车单车耗电量远大于平原城市; 进而, 使得山地城市电动汽车充电负荷的时/空分布与平原

基金项目: 国网重庆市电力公司科技项目: 基于大数据驱动和数字孪生推演的电动汽车充换电关键技术研究(5220002000C0)。

State Grid Chongqing Electric Power Company Science and Technology Project, Research on Key Technologies of Electric Vehicle Charging and Swapping Based on Big Data-driven and Digital Twin Deduction (5220002000C0)。

城市不同；最终，导致充电设施的规划方法不同。

充电设施规划是以群体充电负荷预测为基础依据；在群体充电负荷预测方面，山地城市与平原城市有较大不同，这可以归因于单车耗电量的差异。现有充电负荷研究涉及了时间与空间两个维度：1) 从时间维度看，文献 [3] 建立了一种电动汽车全过程行为边界模型，采用集合参数表征单体或集群电动汽车充电及行驶行为特性，提出了长时间尺度下负荷预测方法与有序充放电分层调度架构。文献 [4] 从群体的角度出发，提出了在分布式控制框架下，电动汽车实时充放电优化的互动调度策略。文献 [5] 计及实时交通与温度，提出了一种基于马尔可夫决策过程随机路径模拟的城市电动汽车充电负荷时空分布预测方法。文献 [6] 利用概率统计学和蒙特卡洛模拟方法，建立了电动汽车充电负荷预测模型。文献 [7] 提出了一种基于电动汽车数量的改进 BASS 模型和基于蒙特卡洛仿真的负荷预测方法。上述文献主要研究了平原城市充电负荷预测方法，未考虑山地城市与平原城市单车耗电量的差异性，更没有研究该差异性对充电负荷在时间维度上分布的影响。2) 从空间维度看，文献 [8] 根据居民出行调研统计数据，对电动汽车出行规律进行概率分布函数拟合，构建了电动汽车出行链模型，通过蒙特卡洛方法计算得到了不同区域的充电负荷。文献 [9] 则考虑了交通信息与电网信息对电动汽车行驶的交互影响，为电动汽车车主制定了充电导航策略，并分析了该策略下充电负荷对配电网的影响。文献 [10] 利用网约车出行轨迹数据进行数据挖掘，对空间网格与交通路网进行建模，处理得到了功能区域划分、车辆出行规律分布、实际行驶路径等数据，并据此建立了电动汽车单体模型；进而，提出了群体充电负荷预测方法。可以看出，目前在空间维度上的充电负荷预测相关研究较少，并且，缺乏研究三维山地城市道路空间结构对耗电量及群体充电负荷的影响。

山地与平原地形相比，群体充电负荷预测差异较大，将导致充电设施规划方法显著不同。现有的充电设施规划研究成果主要基于平原城市特征：文献 [11] 提出了一种基于变权 Voronoi 图和混合离散粒子群算法的充电站优化规划算法。文献 [12] 在充电需求预测的基础上进行统计分析，提出了最优电动出租车充电站选址方案。文献 [13]

在考虑社会因素并确定一定数量备选站点的背景下，提出了一种从备选建设方案中选择社会成本最低方案的最优充电站规划方法。文献 [14] 根据负荷特性对电动汽车充电负荷进行细化建模，并考虑了负荷的发展趋势，建立了规划区配电变压器综合负荷的自然增长模型。文献 [15] 建立了一种两阶段随机规划模型，用于规划带有单输出多电缆充电点的公共停车场充电站。文献 [16] 为了减少充电站选址定容对配电网产生的不利影响，建立了考虑配电网负荷波动和电压偏移的电动汽车充电站优化规划模型。上述文献是基于平原城市充电负荷特性对充电站进行规划，未考虑山地城市与平原城市充电站规划方案的差异性。文献 [17] 在规划充电站时，考虑了山地城市单车耗电成本，但未将其用于群体负荷预测，也未考虑充电站选址对群体充电负荷的时空分布影响。

综上，本文首先建立了山地城市单车耗电模型；其次，考虑山地城市单车耗电特性对充电负荷时空分布的影响，建立了群体充电负荷预测模型；最后，提出了山地城市充电设施规划方法，通过开展群体负荷预测与充电设施规划迭代优化计算，获得最优规划方案。

1 山地城市单车耗电模型

对电动汽车行驶耗电量进行分析时，首先不考虑山地城市道路特征，如图 A1，假设用户行驶时始终选择距离最短的路径，则车辆的行驶耗电量仅由两点间的水平距离与单位里程耗电量决定，耗电量计算方式为

$$Q_{o,d} = p \sum_{i,j \in X} L_{i,j} \quad i, j \in R \quad (1)$$

式中： $Q_{o,d}$ 为车辆从出发点行驶到目的地的耗电量； p 为车辆在水平方向上行驶时的单位里程耗电量； $L_{i,j}$ 为两个相邻节点 i, j 之间的水平距离； X 为从出发地到目的地用户选择的路径； R 为路网节点集合。

在考虑山地城市道路特征情况下，如图 A2，由于车辆爬坡时克服重力做功，车辆行驶耗电量还与其上升的垂直高度有关，因此对山地城市道路建模时，需要考虑两点间海拔差，进行三维建模，如下所示：

$$D_{i,j} = \sum_c^c d_c \quad (2)$$

$$d_c = \sqrt{l_c^2 + h_c^2} \quad (3)$$

式中： $D_{i,j}$ 为山地城市路网中*i, j*两点间实际距离； d_c 为*i, j*两点间第*c*段的实际距离； l_c 为第*c*段的水平距离； h_c 为第*c*段的海拔差。

对山地城市实际道路进行简化建模后，山地城市电动汽车耗电量模型则改为

$$Q'_{o,d} = p_d \sum_{i,j \in X} D_{i,j} \quad i, j \in R \quad (4)$$

式中： $Q'_{o,d}$ 为考虑山地城市道路特征的耗电量； p_d 为山地实际道路行驶时的单位里程耗电量； $D_{i,j}$ 为山地城市路网中*i, j*两点间实际距离。

计算 p_d 时需要对电动汽车行驶时各时段的速度、加速度进行分析^[18]，文献^[19]提出了通过综合考虑电动汽车的行驶速度、加速度和道路坡度对 p_d 进行精确计算的方法，但该数据难以收集且分析过程十分复杂，由于本节主要是分析山地城市与普通平原城市的耗电量差异，无需精确计算车辆在各路径上的单位里程耗电量，因此采用聚合方式表示山地城市耗电量^[20]：

$$Q_{o,d} = p \sum_{i,j \in X} L_{i,j} + \sum_{i,j \in X} \alpha_{i,j} H_{i,j} \quad (5)$$

式中： $\alpha_{i,j}$ 为电动汽车在爬坡时的克服重力做功系数，称为爬坡系数，单位为 kW·h/m。

电动汽车在行驶过程中，除了在上坡时需要克服重力额外做功外，还会因为车辆制动回收部分能量。由于能量回收效率与车辆实际运行状态有关^[21]，需要采集车辆运行全过程中多种参数数据才能对其进行精确计算，本文只需引入该概念来计算比较山地城市与普通平原城市的耗电量差异，因此将其设置为定值，则山地城市耗电量模型改进为：

$$Q_{o,d} = (p \sum_{i,j \in X} L_{i,j} + \sum_{i,j \in X} \alpha_{i,j} H_{i,j})(1 - \eta_x) \quad (6)$$

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} \alpha_{i,j}, & H_{i,j} > 0 \\ 0, & H_{i,j} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： η_x 为电动汽车行驶能量回收效率。

计算爬坡系数 $\alpha_{i,j}$ 时，除了考虑爬坡时克服重力做功，还需要考虑车辆克服空气阻力、滑动摩擦力、其他阻力做功。由于不同车型的电动汽车车重不同，其行驶耗电量也会有差异，但由于当前电动汽车车型各异，难以对每类车型做具体分析，且车重对负荷预测结果影响较小，因此单车

耗电量建模仅考虑单一车型。车辆在上坡时的耗电功率可表示为：

$$P_{up} = \frac{\left(\frac{m_v g}{\sin \theta} + F_r + F_a + F_d \right) v_\theta \sin^2 \theta}{l_v} \quad (8)$$

式中： m_v 为车辆质量； F_r 为滑动摩擦力； F_a 为空气阻力； F_d 为其他阻力； v_θ 为车辆爬坡速度； θ 为坡度； l_v 为车辆电池能量转换效率。

$$\alpha_{i,j} = \frac{\int_0^1 \left(\frac{m_v g}{\sin \theta} + F_r + F_a + F_d \right) v_\theta \sin^2 \theta dr}{l_v \int_0^1 v_\theta \sin \theta dr} \quad (9)$$

式中：公式上半部分表示车辆爬坡 1h 的耗电量，公式下半部分表示车辆爬坡 1h 在垂直方向上上升的高度，两者相除即为爬坡系数，单位为 W·h/km，将其转换为 kW·h/m，则 $\alpha_{i,j}$ 表示为

$$\alpha_{i,j} = \frac{\int_0^1 \left(\frac{m_v g}{\sin \theta} + F_r + F_a + F_d \right) v_\theta \sin^2 \theta dr}{10^6 l_v \int_0^1 v_\theta \sin \theta dr} \quad (10)$$

建立山地城市电动汽车单车耗电模型后，将其类比到群体，对山地城市群体电动汽车充电负荷进行预测，进而进行充电设施规划。

2 山地城市群体充电负荷预测

2.1 电动汽车充电需求预测

本文基于规划区各路网节点车流量数据进行充电负荷预测，以 ΔT 为时间间隔，每隔 ΔT 计算一次该时间段内经过各路网节点的车流量，通过电动汽车渗透率与电动汽车快充需求比例，计算其中需要充电的电动汽车数量。具有快充需求的电动汽车数量预测模型为

$$N_{ev}(t, i) = N_{ev}(t, i) \rho \sigma r \quad (11)$$

式中： $N_{ev}(t, i)$ 为第*t*时间段内驶过*i*节点并具有充电需求的电动汽车数量； $N_{ev}(t, i)$ 为第*t*时间段内驶过*i*节点的汽车总量； ρ 为电动汽车渗透率； σ 为电动汽车快充需求比例； r 为修正系数。

由于在 ΔT 时间段内同一车辆可能会行驶经过多个节点，导致预测充电需求时该车辆会被重复计算，将其类比到群体车辆时，大量车辆被重复计算会导致充电负荷预测误差过大，因此引入修正系数，如下所示：

$$r = \frac{L_{i,j}}{v_0 \Delta T} \quad (12)$$

式中： $L_{i,j}$ 为任意两个路网节点之间的距离； v 为

车辆平均行驶速度； ΔT 为车流量监测时间间隔。

使用改进 Floyd 算法对山地城市单车耗电量进行计算^[22]。将各节点间的行驶耗电量代替行驶距离作为两点间权值，并假设用户出行总是选择耗电量最低的路径行驶，可计算路网任意两点间的电动汽车行驶耗电量。

2.2 电动汽车充电建模

山地城市道路呈 3D 结构，且由前述山地城市单车耗电量建模可得，车辆存在大量克服重力做功，此时用户的充电行为主要受行驶耗电量影响，同时选择的充电站位置、车辆的到站时间、剩余电量与充电时间均发生改变，充电负荷时空分布亦随之发生改变。

预测出电动汽车充电需求后，使用蒙特卡洛法随机抽取此时电动汽车的剩余电量，结合改进 Floyd 算法耗电量计算，预测电动汽车用户会选择何充电站进行充电，则用户到站时间为

$$t_1 = t_0 + \frac{\sum_{i,j \in X} \sqrt{L_{i,j}^2 + H_{i,j}^2}}{v_0} \quad (13)$$

式中： t_1 为电动汽车到达充电站接入充电桩的时刻； t_0 为电动汽车产生快充需求的时刻； X 为电动汽车驶往充电站的路径； i, j 为路径中任意相邻两节点； v 为行驶平均速度。则电动汽车到达充电站时，剩余电量表示为^[23]

$$S_{cha} = S_{start} - \frac{E_X}{Q_{ev}} \quad (14)$$

式中： S_{cha} 为车辆到站剩余电量，即充电起始电量； S_{start} 为车辆产生快充需求时的剩余电量； E_X 为车辆在驶往充电站途中的消耗电量； Q_{ev} 为车辆电池容量。

据统计，多数电动汽车厂商设定电池荷电状态在 20%~80% 时具有较高的充电功率，超过 80% 后为保护电池安全会延长充电时间，因此可设电动汽车充电结束荷电状态为 80%^[24]。除此之外，充电时间还与充电方式与充电桩效率有关，一般在 90% 左右，则车辆充电时间表示为：

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_{ev}(0.8 - S_{cha})}{p_z \eta_z} \quad (15)$$

式中： t_2 为车辆充电结束时间； p_z 为充电功率； η_z 为充电桩充电效率。由上述模型可得每辆电动汽车起始充电与充电结束时间，则充电负荷表示为：

$$P_{sta}(t) = \sum_{n=1}^{N_v} p_v(t) \quad (16)$$

式中： $P_{sta}(t)$ 为充电站在 t 时刻充电负荷； N_v 为 t 时刻充电电动汽车总量； $p_v(t)$ 为 t 时刻单辆电动汽车充电功率，即充电桩功率。

3 充电设施规划建模

充电站的选址会影响电动汽车接入电网的时间与地点，山地城市单车耗电量会影响电动汽车接入电网的剩余电量与充电时间，即两者共同影响了充电负荷的时空分布。

因此，采用充电负荷预测与充电站规划迭代计算的方法，即在备选路网节点中建站，以充电负荷时间尺度波动更小与空间分布更均衡为目标，选择最优规划位置，并为其配备适宜数量充电桩，使其能满足用户充电需求，规划流程如图 1 所示。由于充电站规划主要针对远景规划年，则式 (11) 可修改为：

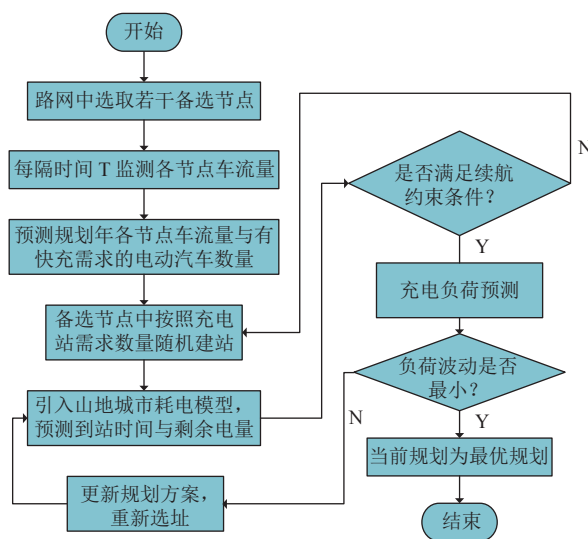


图 1 山地城市充电站规划流程图

Fig. 1 Flow chart of charging station planning in mountain city

$$N_{ev}(t, i) = N_{ev}(t, i)(1 + \beta)^m \rho \sigma \% r \quad (17)$$

式中： β 为车辆年平均增长率； m 为现年到规划年的时间间隔，单位为年。

为使规划的充电站位置合理，既要保证各站充电负荷波动不能过大，也要保证到各个站充电的电动汽车数量均衡，则充电站规划目标函数为：

$$\min Z = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{sta}} \left(1 - \frac{A_k}{A_1}\right)^2} + \frac{1}{N_{sta}} \sum_{k=1}^{N_{sta}} \frac{r_k}{A_k} \quad (18)$$

式中： N_{sta} 为规划充电站数量； A_k 为充电站平均充电负荷； V_k 为充电站负荷均方差。

每个站规划的充电桩数量要能保证用户的充电需求，则充电桩数量约束为：

$$\int_0^T P_{sta}(t)dt \leq p_z N_z T_{cha}(1 - \eta) \quad (19)$$

式中： N_z 为建桩数量； T_{cha} 为充电桩一天内服务时长； η 为充电桩闲置率。

电动汽车电池不能过充过放，约束为：

$$S_i^{\min} \leq S_i^{\text{pre}} \leq S_i^{\max} \quad (20)$$

式中： S_i^{\min} 为电动汽车产生充电需求的最低电量； S_i^{pre} 为电动汽车当前电量； S_i^{\max} 为电动汽车充电最高电量。

电动汽车充电站与产生充电需求点距离不能超过电动汽车续航里程，约束为：

$$0 \leq L_{o,d}(t) \leq M_i(t) \quad (21)$$

式中： $L_{o,d}(t)$ 为电动汽车从充电需求点到充电站的距离； $M_i(t)$ 为产生充电需求时电动汽车的续航里程。

4 算例分析

4.1 参数设置

选取中国西南地区某山地城市中某路网系统为例进行分析，该路网包含 20 个节点与 31 条支路。在该算例中，假设各种车型一致，即车辆大小、质量、电池能量转换效率相同，令 m_v 始终等于 2 ton，为便于计算，假设所有阻力在垂直方向上始终保持为 4000 N，爬坡行驶速度 v_θ 设为 40 km/h，坡度 θ 可变，图 2 为该路网节点系统结构图。

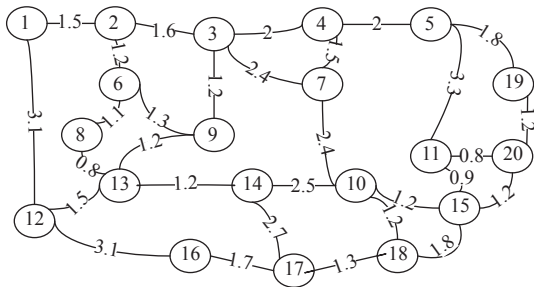


图 2 规划区路网结构

Fig. 2 Road network structure of the planning area

图中两点间连线表示实际路网中的道路情况，有连接线表示两点有道路连接，连接线上的数字表示两点间道路距离，单位为 km，该距离通过地图测得。除了需要路网各节点的道路连接情况、水平距离之外，还需要各节点的海拔数据，由于该数据涉及保密问题，此处根据实际地形情况对各节点海拔进行假设，如表 1 所示。

表 1 各节点海拔示意

Table 1 Altitude diagram of each node

| 节点编号 | 海拔/m | 节点编号 | 海拔/m |
|------|------|------|------|
| 1 | 280 | 11 | 360 |
| 2 | 280 | 12 | 340 |
| 3 | 280 | 13 | 360 |
| 4 | 340 | 14 | 360 |
| 5 | 340 | 15 | 380 |
| 6 | 280 | 16 | 400 |
| 7 | 340 | 17 | 420 |
| 8 | 280 | 18 | 400 |
| 9 | 330 | 19 | 400 |
| 10 | 340 | 20 | 420 |

4.2 结果讨论

1) 根据山地城市道路结构计算单车耗电量，当道路坡度逐渐增大时，行驶耗电量也逐渐增大，具体计算结果如图 3 所示。

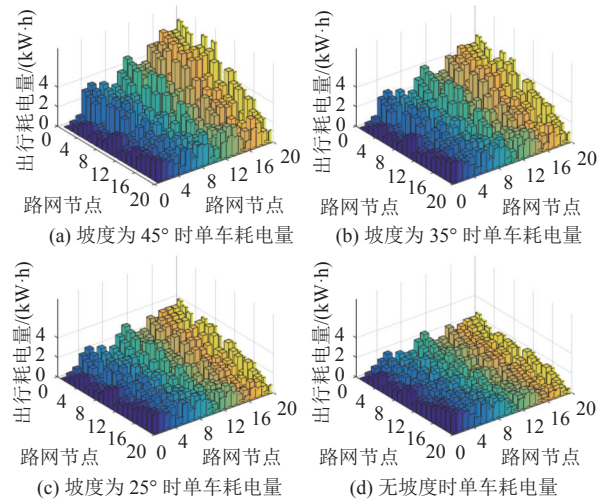


图 3 不同坡度下单车耗电量

Fig. 3 Electric vehicle power consumption under different slopes

由图 3 可看出，当爬坡坡度为 45° 时，电动汽车单车行驶耗电量最大可达 6.8473 kW·h；坡度为 35° 时，耗电量最大可达 5.2775 kW·h；坡度为

25°时,耗电量最大可达 3.8971 kW·h;电动汽车在平原城市行驶时,耗电量最大为 2.525 kW·h。该结果证明随着坡度变大,电动汽车单车耗电量也逐渐增大。

2) 基于山地城市电动汽车单车耗电量,对群体充电负荷进行预测时,使用该路网系统中 2012 年车流量数据,车流量检测间隔 ΔT 为 15 min,若规划年为 2022 年,则式中 $m=10$,据统计,平均每天有 6% 的电动汽车选择在城市快充站充电^[25],即 σ 为 6,假设电动汽车渗透率 ρ 为 5%,车辆平均增长率为 5%,车辆行驶速度为 40 km/h,则规划年该路网系统中一天各时间段具有快充需求的电动汽车数量如图 4 所示。

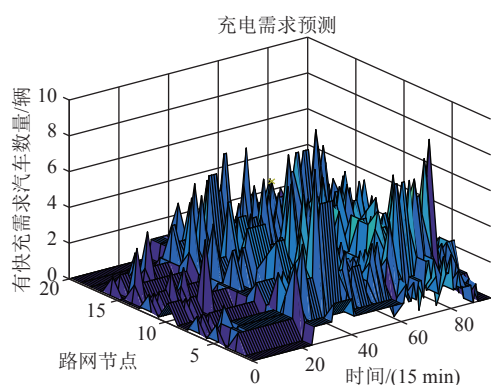


图 4 电动汽车快充需求预测

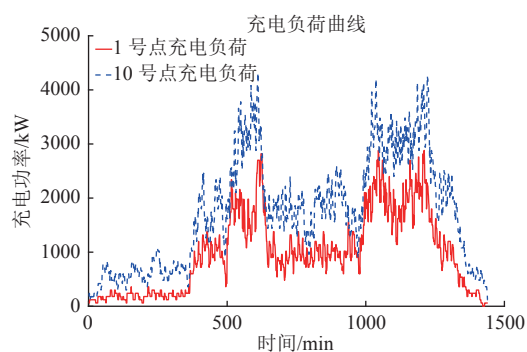
Fig. 4 Fast charging demand forecast for electric vehicles

以 1 号、10 号点设充电站(方案 1)和 5 号、13 号点设充电站(方案 2)为例进行群体充电负荷预测,结果如图 5 所示。

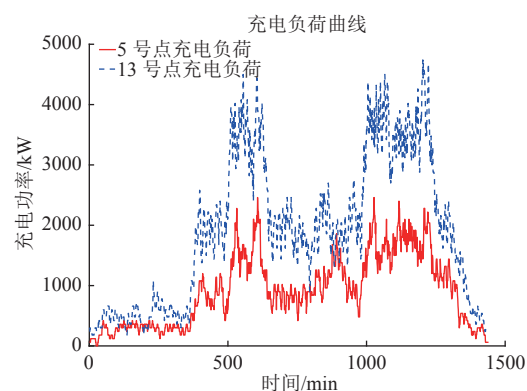
由图 5 可得,方案 1 中,1 号充电站一天中最大充电功率可达 2820 kW,需设 18 根充电桩。10 号充电站一天中最大功率可达到 4500 kW,需设 33 根充电桩。

方案 2 中,5 号充电站一天中最大充电功率可达 2160 kW,需设 17 根充电桩,13 号充电站最大充电功率可达 5040 kW,需设 36 根充电桩,对比方案 1 可得,两个站的负荷分配较不均衡。由此可得,充电站的选址会影响电动汽车用户的充电选择,进而导致充电负荷与需设充电桩数量发生改变。

3) 山地城市道路特性与充电站位置均会影响充电负荷的时空分布,将充电站规划与群体充电负荷预测迭代计算,使用遗传算法进行求解。考虑山地城市道路坡度时,充电站最优规划位置



(a) 方案 1 充电负荷



(b) 方案 2 充电负荷

图 5 不同选址方案下负荷预测结果

Fig. 5 Load prediction results under different site selection schemes

为 5 号点与 14 号点;不考虑山地城市道路坡度时,充电站最优规划位置为 4 号点与 8 号点。两种情况下的规划收敛情况及其充电负荷结果如图 6 与图 7 所示。

考虑山地城市坡度影响时,在最优规划方案下,5 号站最大充电功率为 3180 kW,14 号站最大充电功率为 3000 kW,需配置的充电桩数量为 5 号站 20 台,14 号站 19 台。对比图 5 中考虑坡度情况下的 2 种规划方案分析可得,在最优规划方案下,各站自身充电负荷峰谷差减小,在时间尺度上负荷波动降低,且在空间尺度上,各站之间充电负荷更加均衡。

不考虑山地城市坡度影响时,最优规划方案下,4 号站最大充电功率为 3180 kW,8 号站最大充电功率为 2580 kW,需配置的充电桩数量为 4 号站 20 台,8 号站 18 台。2 种情况的最优规划结果如图 8 所示,其中棕色五角星代表考虑坡度影响时充电站最优规划位置,紫色五角星代表不考虑坡度影响时充电站最优规划位置。对比两种情况可得,考虑山地城市坡度影响与不考虑山地城

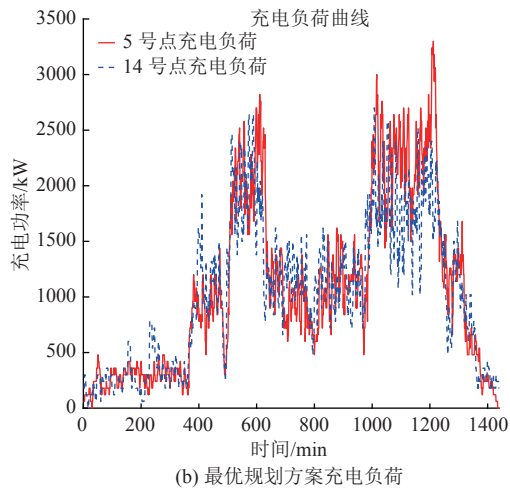
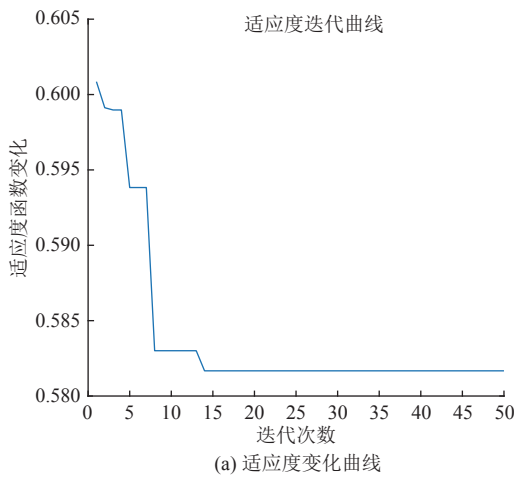


图 6 考虑坡度时充电站最优规划方案及其负荷预测曲线

Fig. 6 Optimal planning scheme of charging station and its charging load when considering slope

市坡度影响时，充电站规划结果与负荷预测结果均不同，针对普通平原城市的充电站规划方法不再适用于山地城市。

5 结论

1) 山地城市空间特性会影响电动汽车行驶耗电量。山地城市由于路网节点间存在海拔差，电动汽车耗电量与平原城市存在较大差异；在相同的 2 维路网拓扑投影下，考虑山地地形特征的电动汽车耗电量可高于不考虑山地地形特征耗电量的 1.5 倍。

2) 山地地形条件下，电动汽车群体充电负荷时空分布与充电设施规划相互影响。随着山地城市道路坡度等级不断增大，电动汽车耗电量不断增大，电动汽车用户的充电选择、充电负荷曲

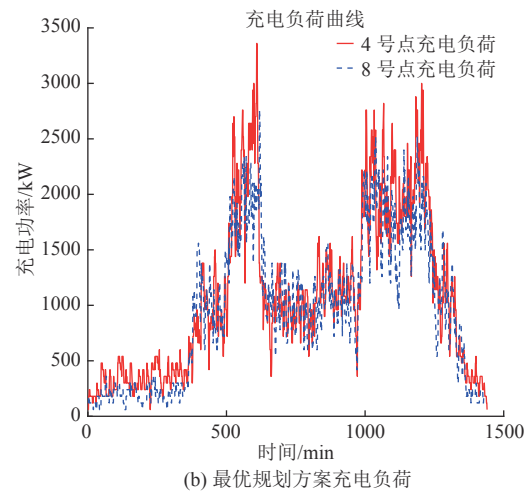
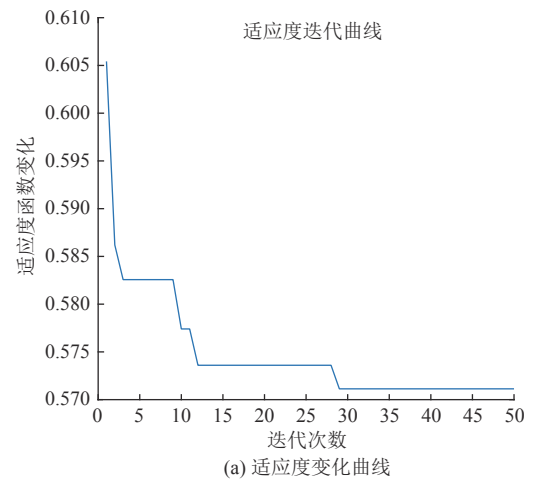


图 7 不考虑坡度时充电站最优规划方案及其负荷预测曲线

Fig. 7 Optimal planning scheme of charging station and its charging load without considering slope

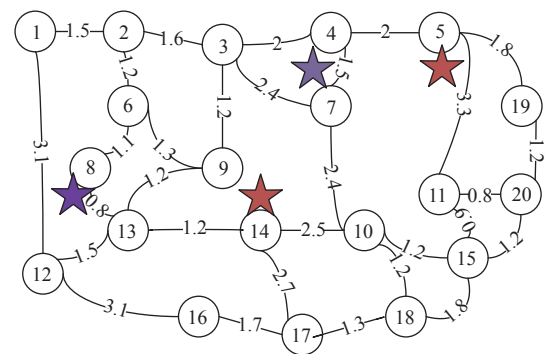


图 8 充电站最优规划位置

Fig. 8 Optimal planning location map of charging station

线与各充电站规划位置均随之变化。因此，传统针对平原城市的充电设施规划方法不再适用于山地城市，需要专门山地城市针对性的充电设施规划方法与模型。

3) 考虑山地城市单车耗电特性，将充电负

荷预测与充电设施规划迭代分析计算,能够在满足用户充电需求的约束条件下,进一步使得山地城市充电负荷在时间上波动性更小,在空间上分布更均衡。

(本刊附录请见网络版,印刷版略)

参考文献

- [1] 于海东,张焰,潘爱强. 电动私家车充电负荷中长期推演模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 80–87.
YU Haidong, ZHANG Yan, PAN Aiqiang. Medium-and long-term evolution model of charging load for Private electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 80–87(in Chinese).
- [2] 刘川. 山地城市道路网络关键节点和路段对路网脆弱性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [3] 段小宇, 胡泽春, 崔岩, 等. 长时间尺度下的电动汽车有序充放电调度[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4037–4044.
DUAN Xiaoyu, HU Zechun, CUI Yan, *et al.* Optimal charging and discharging strategy for electric vehicles in large timescales[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4037–4044(in Chinese).
- [4] 甘霖, 胡帆, 杨思渊, 等. 面向电动汽车集群实时充放电优化的分群调度机制[J]. 电力建设, 2019, 40(1): 41–48.
GAN Lin, HU Fan, YANG Siyuan, *et al.* Group-based interactive scheduling mechanism for real-time charging and discharging optimization of electric vehicle clusters[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(1): 41–48(in Chinese).
- [5] 张谦, 王众, 谭维玉, 等. 基于MDP随机路径模拟的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 59–66.
ZHANG Qian, WANG Zhong, TAN Weiyu, *et al.* Spatial-Temporal distribution prediction of charging load for electric vehicle based on MDP random path simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 59–66(in Chinese).
- [6] 王浩林, 张勇军, 毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 213–219.
WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 213–219(in Chinese).
- [7] ZHANG N, TAO H Z, LIU Y T, *et al.* Short-term load forecasting algorithm based on LSTM-DBN considering the flexibility of electric vehicle[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(4): 042001 (8pp).
- [8] 邵宇鹰, 彭鹏, 陈桂儒, 等. 电动汽车充电负荷时空分布的空间负荷预测[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(10): 2139–2144.
SHAO Yuying, PENG Peng, CHEN Guiru, *et al.* Spatial load forecasting based on time and space distribution of electric vehicle charging load[J]. Computer & Digital Engineering, 2021, 49(10): 2139–2144(in Chinese).
- [9] 严奔遥, 罗禹贡, 朱陶, 等. 融合电网和交通网信息的电动汽车最优充电路径推荐策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 310–318.
YAN Yiyao, LUO Yugong, ZHU Tao, *et al.* Optimal charging path recommendation strategy for electric vehicles based on power grid and transportation network information[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 310–318(in Chinese).
- [10] 邢强, 陈中, 黄学良, 等. 基于数据驱动方式的电动汽车充电需求预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3796–3813.
XING Qiang, CHEN Zhong, HUANG Xueliang, *et al.* Electric vehicle charging demand forecasting model based on data-driven approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3796–3813(in Chinese).
- [11] 麻秀范, 王皓, 李颖, 等. 基于变权 Voronoi 图和混合粒子群算法的电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 160–169.
MA Xiufan, WANG Hao, LI Ying, *et al.* Optimal planning of charging stations for electric vehicle based on weight-changed voronoi diagram and hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 160–169(in Chinese).
- [12] SHI Ruifeng, LIU Jiahua, LIAO Zhenhong, *et al.* An electric taxi charging station planning scheme based on an improved destination choice method[J]. Energies, 2019, 12(19): 3781.
- [13] MENG Xuyao, ZHANG Weige, BAO Yan, *et al.* Sequential construction planning of electric taxi charging stations considering the development of charging demand[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259(prepublish): 120794.
- [14] 范苏纯, 黄向敏, 张勇军, 等. 计及有序充电的配电变压器扩展规划建模[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(07): 62–70.
FAN Suchun, HUANG Xiangmin, ZHANG Yongjun, *et al.* Modeling of expansion planning for distribution transformer considering orderly charging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(07): 62–70(in

- Chinese).
- [15] LIU Yingxin, DONG Houqi, WANG Shengyan, *et al.* An optimization approach considering user utility for the PV-Storage charging station planning process[J]. *Processes*, 2020, 8(1): 83–83.
- [16] 曹佳佳, 王淳, 霍崇辉, 等. 考虑配电网负荷波动和电压偏移的充电站优化规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(04): 12–19.
CAO Jiajia, WANG Chun, HUO Chonghui, *et al.* Optimization planning of charging station considering load fluctuation and voltage offset of distribution network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(04): 12–19(in Chinese).
- [17] 周思宇, 顾博, 张晓勇, 等. 计及山地城市时空特性的充电设施最优规划[J]. *电网技术*, 2020, 44(06): 2229–2237.
ZHOU Siyu, GU Bo, ZHANG Xiaoyong, *et al.* Optimal planning for charging facilities considering spatial and temporal characteristics of mountainous cities[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(06): 2229–2237(in Chinese).
- [18] 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 Yunong, LIN Shunjiang, TANG Zhiqiang, *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.
- [19] VAHIDI A, SCIARRETTA A. Energy saving potentials of connected and automated vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, S0968090X18305199.
- [20] 周思宇. 面向典型山地城市的电动汽车充电设施多场景规划研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [21] LI Shengqi, YU Bo, FENG Xinyuan. Research on braking energy recovery strategy of electric vehicle based on ECE regulation and I curve[J]. *Science Progress*, 2020, 103(1): 1–17.
- [22] 梅杰. 考虑电动汽车交通属性的充(换)电站规划研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [23] 邓艺璇, 黄玉萍, 黄周春. 基于随机森林算法的电动汽车充放电容量预测[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(21): 181–188.
DENG Yixuan, HUANG Yuping, HUANG Zhouchun. Charging and discharging capacity forecasting of electric vehicles based on random forest algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(21): 181–188(in Chinese).
- [24] 邢强, 陈中, 冷钊莹, 等. 基于实时交通信息的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(02): 534–550.
XING Qiang, CHEN Zhong, LENG Zhaoying, *et al.* Route planning and charging navigation strategy for electric vehicles based on real-time traffic information[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(02): 534–550(in Chinese).
- [25] HE Jia, YANG Hai, TANG Tieqiao, *et al.* An optimal charging station location model with the consideration of electric vehicle's driving range[J]. *Transportation Research Part C*, 2018, 86: 641–654.

收稿日期: 2022-06-07

作者简介:

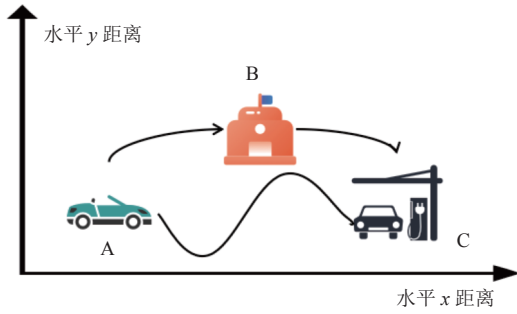
龙虹毓(1978), 男, 博士, 教授级高级工程师, 通信作者, 研究方向为新能源汽车并网运营、电力人工智能与大数据技术, E-mail: longhy@cqupt.edu.cn;

周游(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源汽车并网与电力系统运营, E-mail: 1540870671@qq.com;

陈芳幸(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源汽车并网与车-路-网协同, E-mail: 2524761841@qq.com。

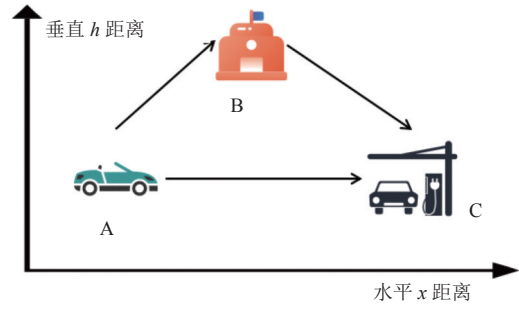
附录 A

在典型山地城市中，由于路网两点间存在海拔差，即存在“垂直距离”，传统 2D 平面结构不再适宜用于表征山地城市，山地城市的道路结构也从二维平面上升为三维空间，其道路结构如下图所示：



附图 A1 平原城市道路结构图

Fig. A1 Road structure map of plain city



附图 A2 山地城市道路结构图

Fig. A2 Road structure map of mountain city