

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210751

计及气象因素的区域电动汽车充电负荷建模方法

张琦, 杨健维, 向悦萍, 何正友

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610000)

摘要: 电动汽车充电负荷受气象因素影响显著, 且在不同区域显示出相应的特征。提出一种计及气象因素的区域电动汽车充电负荷建模方法, 以便更准确掌握电动汽车充电需求。首先, 建立车载空调耗电量和车载电池容量随气温变化的关联模型, 分析不同气象条件下电动汽车的充电需求。其次, 建立适宜气象条件下区域电动汽车充电负荷时空分布模型框架。进而, 引入气象因素对电动汽车充电需求的影响, 提出计及气象因素的区域电动汽车充电负荷建模方法, 刻画电动汽车充电负荷随气象变化的关系。最后, 基于上海市典型日气象数据进行仿真, 结果表明, 电动汽车充电负荷受气象因素影响明显, 所提建模方法能有效反映不同气象条件下区域电动汽车充电负荷的变化情况。

关键词: 电动汽车; 区域充电负荷; 气象因素; 车载空调; 车载电池

Regional electric vehicle charging load modeling method considering meteorological factors

ZHANG Qi, YANG Jianwei, XIANG Yueping, HE Zhengyou

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

Abstract: The electric vehicle (EV) charging load is significantly affected by meteorological factors and shows corresponding characteristics in different regions. A regional EV charging load modeling method considering meteorological factors is proposed to ascertain EV charging demand more accurately. First, a correlation model of on-board air conditioning power consumption and battery capacity with temperature is established to analyze the charging demand of EV under different meteorological conditions. Secondly, a spatial and temporal distribution model framework of regional EV charging load under suitable meteorological conditions is established. The influence of meteorological factors on EV charging demand is introduced, and a regional EV charging load modeling method is proposed considering meteorological factors. This describes the relationship between EV charging load and meteorological changes. Finally, a simulation is carried out based on the typical daily meteorological data of Shanghai. The results show that the EV charging load is significantly affected by meteorological factors, and the proposed modeling method can effectively reflect the regional EV charging load changes under different meteorological conditions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51807168).

Key words: electric vehicle; regional charging load; meteorological factors; on-board air conditioning; on-board battery

0 引言

近些年, 电动汽车(Electric Vehicle, EV)发展迅速, EV保有量与日俱增, 据国际能源署(IEA)发布的《全球电动汽车展望2020》报道^[1], 2019年全球EV保有量已达到720万辆, 到2030年, EV保有量将达到2.45亿辆。然而, 由于EV的充电时间与地点具有较强的随机性, 大规模EV无序充电可能

造成电网负荷峰谷差加大、网损增加^[2]等问题。对EV充电负荷建模, 有利于掌握EV充电规律, 为引导EV有序充电提供依据^[3], 从而有效降低EV无序充电对电网造成的负面影响。

气象环境会对EV车主的出行与充电行为产生影响, 从而改变EV充电负荷。同时, 随着未来EV保有量的不断增加, 气象因素对EV充电负荷的影响将随着大规模EV的出现而产生明显的增量, 对电网造成不可忽视的影响。因此, 在EV充电负荷建模过程中引入气象因素, 从而帮助电网更准确地

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51807168)

掌握 EV 在各类气象环境下的充电负荷特性, 为电网实施相应优化运行控制策略提供有价值的参考。

当前关于 EV 充电负荷建模的研究主要以预测模型为主: 一方面集中在充电负荷的预测上, 如利用蒙特卡洛法^[4-5]、统计学数据拟合分析法^[6-7]、logistic 回归分析法^[8]、聚类分析法^[9]等; 另一方面侧重于 EV 充电负荷时空预测, 文献[10-15]利用马尔科夫出行链模拟 EV 的出行与充电行为, 建立 EV 充电负荷时空预测模型。此类研究重点在于如何利用出行链准确模拟 EV 充电负荷时空分布特性, 以反映车主出行的复杂性与随机性。

气象条件包括气温、天气状况等, 其中气温较其他气象因素对 EV 充电负荷的影响更为显著。现有研究也多通过环境温度开展 EV 充电负荷建模。文献[14]采用模糊数学理论建立了考虑环境温度与交通路况的 EV 耗电量模型; 文献[15-16]通过数据拟合得到 EV 行驶速度与单位里程耗电量的能耗因子模型, 由此建立考虑环境温度的 EV 充电负荷预测模型; 文献[17]结合 EV 平均续航里程、行车需求统计数据, 计算不同温度下的 EV 充电负荷。综上所述, 此类研究多利用统计数据建立环境温度与 EV 充电负荷间的关系, 由于数据具有随机性, 且拟合数据量较少, 故此类模型的可靠性有待进一步验证。

在 EV 车载空调耗电相关研究中, 文献[18-21]基于不同方法建立了车载空调耗电量的计算模型, 但较少考虑车载空调耗电对 EV 充电负荷的影响。

基于此, 本文从气温对 EV 充电负荷的影响入手, 从车载空调耗电量与车载电池容量随气温变化两方面, 分析气象因素对 EV 充电需求的影响。通过衡量气象因素与 EV 充电负荷间的关系, 提出了计及气象因素的 EV 充电负荷建模方法。最后, 构建不同气象条件分布场景, 验证了在 EV 充电负荷模型中引入气象因素的必要性及所建模型的反映效果。

1 气象因素对 EV 充电需求影响分析

由于电动私家车的充电行为更具有随机性, 故本文主要讨论电动私家车(以下简称 EV)充电负荷的建模方法。气象因素主要通过影响车载空调耗电量与车载电池容量来改变 EV 充电需求, 故本节以此为切入点建模分析气象因素对单辆 EV 充电需求的影响。

1.1 车载空调耗电量对 EV 充电需求的影响

根据 EV 车载空调的工作原理, 将车载空调按照高温环境下制冷和低温环境下制热两种情况进行建模, 分析车载空调耗电量 Q_{KT} (单位: kWh)对 EV 充电需求的影响。

1.1.1 车载空调制冷负荷

通常, 当环境气温较高时, 大部分车主会选择开启车载空调进行制冷, 此行为将导致 EV 耗电量增加, 从而影响 EV 充电需求。为准确分析因车载空调制冷而引起的 EV 耗电增量, 本文引入车室得热量 Q_1 (单位: W, 下同)。车室得热量是指某时刻车室内和车室外热源进入车室的热量总和, 来源于车室内外温度差传热、太阳辐射传热、室外风量带入热量、设备与乘车人员散热。因此, Q_1 的计算如式(1)所示^[18-20]。

$$Q_1 = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_E + Q_P \quad (1)$$

式中: Q_A 为车身不透明部分传入热量; Q_B 为车玻璃传入热量; Q_C 为新风量带入车室热量; Q_D 为泄漏风量带入车室热量; Q_E 为车内设备(含电动机)散发热量; Q_P 为乘车人员散发热量。

Q_A 主要由车室内外温度差传热产生, 包括车门、车顶、车底等部分, 数学模型如式(2)所示。

$$Q_A = \sum K S_A (T_z - T_0) \quad (2)$$

式中: K 为传热系数; S_A 为车身不透明部分对应表面积; T_0 为设置的车内适宜温度; T_z 为室外综合温度, 是一个假象值, 不能代表外界环境真实气温, 如式(3)所示。

$$T_z = T_w + \frac{\rho_w I_t}{\alpha_w} \quad (3)$$

式中: T_w 为外界环境温度; ρ_w 为车身外表面对太阳辐射的吸收率, 与车体材料的种类和颜色有关; α_w 为车身外表面对流换热系数; I_t 为太阳辐射强度, 如式(4)所示。

$$I_t = I_{DV} + I_{ds} + I_{dg} \quad (4)$$

式中: I_{DV} 为太阳直射辐射强度; I_{ds} 为天空散射强度; I_{dg} 为地面反射强度。

Q_B 由对流传入热量 Q_{B1} 和太阳辐射传入热量 Q_{B2} 两部分组成。其中 Q_{B1} 与 Q_A 性质相同, 故采用相同类型计算公式, 只需替换对应车玻璃的传热系数与表面积即可。计算 Q_{B2} 时, 需先计算车玻璃单位面积吸收热量 q , 如式(5)所示。

$$q = I_t (\eta + \rho_{FS} \frac{\alpha_n}{\alpha_w}) \quad (5)$$

$$Q_{B2} = \sum q S_B$$

式中: η 为太阳辐射对车玻璃的透入系数; ρ_{FS} 为车玻璃对太阳辐射的吸收系数; α_n 为车身内表面对流换热系数; S_B 为车玻璃表面积。

由于车主主动通风换气, 伴随外部空气进入车室的得热量即为新风量带入车室热量。建立 Q_C 的

计算模型, 如式(6)所示。

$$Q_c = 0.278n \cdot \rho \cdot c_{\text{SHC}} \cdot G_c \cdot (T_z - T_0) \quad (6)$$

式中: n 为乘车人数; ρ 为空气密度; c_{SHC} 为比热容; G_c 为按人体卫生标准每人每小时所需空气量。

Q_D 主要由车体自身缝隙造成, 如式(7)所示。

$$Q_D = 0.278n \cdot \rho \cdot L \cdot c_{\text{SHC}} \cdot G_d \cdot (T_z - T_0) \quad (7)$$

式中: L 为车身缝隙总长; G_d 为单位长度每小时进入车室的泄露空气量。

Q_E 包含车内电气设备散热及电动机散热, 使用文献[19]的实测数据进行计算。 Q_p 的数学模型如式(8)所示。

$$Q_p = anP_{\text{P-AV}} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{P-AV}}$ 为正常成年男子的平均散发热量; a 为群集系数, 由于乘车人员具有随机性, 且乘车人员散发热量与性别和年龄等相关, 为了简化实际计算过程, 以成年男子散发热量为参考, 引入群集系数, 作为考虑随机乘车人员的比例系数。

Q_L 中以对流形式传递的得热量 $Q_{L\text{-DL}}$ 可被车内空气吸收, 直接转换为车载空调制冷负荷 $Q_{L\text{-DL}}$; 而以辐射形式传递的得热量 $Q_{L\text{-FS}}$ 需进行相应转换, 才可成为车载空调制冷负荷 $Q_{L\text{-FS}}$ 。 Q_L 的计算模型如式(9)所示。

$$Q_L = Q_{L\text{-FS}} + Q_{L\text{-DL}} = Q_{L\text{-FS}} G(z) + Q_{L\text{-DL}} = Q_{L\text{-FS}} \frac{v_0 + v_1 z^{-1} + \dots + v_n z^{-n}}{1 + \omega_1 z^{-1} + \dots + \omega_n z^{-n}} + Q_{L\text{-DL}} \quad (9)$$

式中: $G(z)$ 为 z 变换传递函数; v_j 、 ω_j 为传递函数系数, 反映不同车体部分得热量转换区别。 $G(z)$ 采用两个 z 多项式商形式时, v_j 、 ω_j 取 2~3 项即可收敛^[22], 简化后如式(10)所示。

$$G(z) = \frac{v_0 + v_1 z^{-1}}{1 + \omega_1 z^{-1}} \quad (10)$$

本节建立了车室得热量与车载空调制冷负荷的传递函数, 车载空调制冷负荷由式(2)一式(10)计算可得。

1.1.1.2 车载空调制热负荷

当外界环境温度较低时, 考虑到行车过程的舒适性与安全性, 车主会开启车载空调进行制热。车载空调制热负荷与制冷负荷模型基本相同, 车载空调制热负荷不需要进行转换。其中, 假设气温较低时车主不主动开窗换风, 在建模时将忽略车体新风量渗透耗热量部分。故车载空调制热负荷 Q_R 的计算如式(11)所示^[20-21]。

$$Q_R = Q_a + Q_b + Q_c + Q_d - Q_e - Q_p \quad (11)$$

式中: Q_a 为车身顶部耗热量; Q_b 为车门、车窗玻璃、车身裙部耗热量; Q_c 为车内地板耗热量; Q_d 为泄漏风量渗透耗热量; Q_e 为车内设备(含电动机)散发热量; Q_p 为乘车人员散发热量。由于 Q_e 与 Q_p 均对车内热负荷有贡献作用, 故叠加时符号为负。

Q_d 、 Q_e 、 Q_p 均采用与车载空调制冷负荷相同的计算模型。 Q_a 、 Q_b 及 Q_c 计算如式(12)所示。

$$\begin{cases} Q_a = K_a S_a (T_T - T_W) \\ Q_b = \sum K_b S_b (T_0 - T_W) \\ Q_c = K_c S_c (T_D - T_W) \end{cases} \quad (12)$$

式中: K_a 、 K_b 及 K_c 为车体各部分对应的传热系数; S_a 、 S_b 及 S_c 为车体各部分对应的表面积; T_T 为车身顶部温度; T_D 为车内地板温度。

本节建立了车载空调制热负荷的模型, 其计算与车载空调制冷负荷基本相同, 但车载空调制热负荷不需要区分传热形式, 由式(11)直接计算可得。

1.1.3 车载空调耗电量对 EV 充电需求的影响

车载空调制冷(或制热)负荷是功率形式, 需转换为车载空调耗电量。本文引入日行驶时长等随机变量, 搭建车载空调耗电量对 EV 充电需求影响的模型。

对 Q_{KT} 建模时, 首先基于蒙特卡洛法抽取 EV 首次出行时间 T_{CX} 、最后返程时间 T_{FC} 和日行驶时长 t_{XS} , 然后依据 t_{XS} 、 T_{CX} 与 T_{FC} 判断 EV 的出行时间段, 最终由 Q_L (或 Q_R) 计算 EV 行驶区间内的 Q_{KT} , 如式(13)所示。

$$Q_{\text{KT}} = \int_{T_{\text{CX}}}^{T_{\text{CX}}+t_{\text{XS}}} Q_L dt + \int_{T_{\text{FC}}-t_{\text{XS}}}^{T_{\text{FC}}} Q_L dt \quad (13)$$

通过衡量 Q_L (或 Q_R)、 t_{XS} 、 T_{CX} 和 T_{FC} 等随机参数与 Q_{KT} 间的关系得到式(13), 借此可以分析不同气象条件下 Q_{KT} 对 EV 充电需求的影响。

本节搭建车载空调耗电量对 EV 充电需求影响的模型。首先, 结合车室外气象分布与车室内设置的适宜温度, 计算车载空调制冷(或制热)负荷; 其次, 引入 EV 首次出行时间、最后返程时间和日行驶时长等随机变量, 计算 EV 行驶过程中的车载空调耗电量, 从而分析车载空调耗电量对 EV 充电需求的影响。

1.2 车载电池容量对 EV 充电需求的影响

与燃油汽车不同, 车载电池是 EV 唯一供能源, 而电池容量会受温度影响, 在低气温时, 其容量会大幅减小^[17], 导致 EV 充电需求发生变化。本文重

点讨论气象因素对 EV 充电负荷的影响, 故有必要建立车载电池容量对 EV 充电需求影响的模型。

利用温度系数 x_T 表征车载电池容量 E 随气温变化的情况^[23], 如式(14)所示。

$$\begin{cases} x_T = \frac{\left(0.000096T_w^3 - 0.01314T_w^2 + 0.6525T_w + 70.7802\right)}{79.989} \\ E = x_T E_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, E_0 为车载电池额定容量。

车载电池容量在不同环境温度下对应不同数值。当气温较高时, 车载电池容量稍有上升, EV 充电电量增加, 致使 EV 充电负荷出现增量; 而当气温较低时, 车载电池容量下降明显, 在气温为 -10°C 时, x_T 仅有 0.79。车载电池容量的快速衰减导致 EV 续航里程大幅减少, 进而通过增加车主充电频次及改变车主的充电时段提升 EV 的充电需求, 最终引起 EV 充电负荷的增加。

2 计及气象因素的区域 EV 充电负荷建模

基于第 1 节中气象因素对 EV 充电需求影响的分析, 本节构建计及气象因素的区域 EV 充电负荷模型。首先, 对 EV 充电负荷分布场景进行设定; 其次, 搭建 EV 动力能耗负荷 Q_{PC} (单位: kW) 的时空分布模型框架。EV 动力能耗负荷是指适宜气象条件下的 EV 充电负荷; 最后, 基于此框架, 引入气象因素对 EV 充电需求的影响, 建立计及气象因素的区域 EV 充电负荷模型。

2.1 EV 充电负荷分布场景

为简化计算, 本文结合实际对 EV 充电负荷的分布场景作如下假设。

- 1) EV 充电站充电能力充足, 车辆无需等候, 且 24 h 全天候运营, EV 充电效率为 90%。
- 2) 由国家标准 GB/T18487.1-2015 电动汽车传导充电系统 第 1 部分通用要求^[24]知: EV 有快充、常规充、慢充的充电模式。
- 3) 依据 EV 出行规律知, 车主日常出行选择常规充和慢充两种模式^[5]。假设 EV 荷电状态(State of Charge, SOC)小于 0.9 时, EV 进行充电; 当 $SOC < 0.2$ 时, EV 选择常规模式充电, 其余情况选择慢充。
- 4) 将场景在空间上划分为: 居民、商业、办公及其他 4 个功能区。

2.2 EV 动力能耗负荷建模

本节在适宜气象条件下, 即忽略车载空调耗电量以及保证车载电池处于最大容量状态, 搭建 Q_{PC} 的时空分布模型框架, 从空间和时间两个尺度分析

EV 充电负荷的特性。

2.2.1 EV 充电负荷空间特性

EV 充电负荷在各功能区具有不同的出行与充电行为。OD(Origin Destination)出行矩阵依据 EV 转移概率与马尔科夫出行链判断 EV 各时段起点与终点位置, 由此得到 EV 的空间分布特性。EV 各时刻空间转移概率 P 矩阵如式(15)所示。

$$P = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{起点/} \\ \text{终点} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{居民区} & \text{商业区} & \text{办公区} & \text{其他区} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{居民区} \\ \text{商业区} \\ \text{办公区} \\ \text{其他区} \end{matrix} & \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (15)$$

式中, P_{ij} 为 EV 从区域 i 到区域 j 的转移概率。

在 P 矩阵的基础上, 基于马尔科夫出行链原理, 依据 EV 出行规律随机抽取起点、终点信息, 借助 P 矩阵判断 EV 某时刻是否进行转移。由此近似模拟 EV 出行过程, 得到 OD 出行矩阵, 其中包含 EV 各时刻的区域位置信息。

2.2.2 EV 充电负荷时空特性

在适宜气象条件下, 建立 Q_{PC} 的时空分布模型。采用蒙特卡洛法抽取单辆 EV 的充电开始时间、日行驶里程等随机变量, 计算得到各功能区 Q_{PC} 一天内的分布情况, 分析 EV 充电负荷的时空特性。

各功能区 EV 的充电开始时间 T_s 有所不同^[5], 其中: 居民区充电开始时间 T_{s1} 服从正态分布; 商业区充电开始时间 T_{s2} 服从均匀分布; 办公区充电开始时间 T_{s3} 服从正态分布; 其他区充电开始时间 T_{s4} 服从均匀分布; EV 日行驶里程 d 服从对数正态分布^[6]。

由于 EV 选择充电与否受 SOC 影响较大, 且 EV 所需补充的电量也与 SOC 直接关联, 故以 SOC 作为判断依据, 决定 EV 是否需要充电及充电电量。每辆车 SOC_r 计算如式(16)所示。

$$SOC_r = SOC_0 - \frac{Q_H}{E_0} \quad (16)$$

式中: SOC_0 为 EV 初始 SOC; Q_H (单位: kWh) 为 EV 动力能耗耗电量, 计算如式(17)所示。

$$Q_H = \frac{d}{d_0} E_0 \quad (17)$$

式中, d_0 为 EV 最大续航里程。

由当前 SOC 值选择 EV 充电模式, 由此可确定 EV 的充电功率与充电时长, 结合各功能区 EV 的充电开始时间, 可得到不同区域的 EV 充电负荷。

本节搭建了 Q_{PC} 的时空分布模型。首先, 采用

蒙特卡洛法生成单辆 EV 的 OD 出行矩阵、首次出行时间、最后返程时间、日行驶时长、充电开始时间、日行驶里程等随机参数；然后，确定 EV 充电时刻所处位置及 SOC 状态，得到单辆 EV 充电负荷的分布情况；最后，叠加各功能区 EV 充电负荷的数据，得到 Q_{PC} 的时空分布曲线。

2.3 计及气象因素的区域 EV 充电负荷建模

考虑到 EV 充电负荷受气象因素影响特性，并基于 EV 动力能耗负荷时空分布模型框架，本节对计及气象因素的区域 EV 充电负荷进行建模。

基于 Q_{PC} 时空分布模型框架，引入气象因素与 EV 充电负荷的关联模型，通过衡量车载空调耗电量、车载电池容量与 SOC 间的关系，建立计及气象因素的区域 EV 充电负荷模型。

引入气象因素时，将其对 EV 充电需求的影响同样体现至 SOC 参数上，由 SOC 状态判断 EV 充电负荷的受影响程度。在式(16)基础上减去 Q_{KT} 对 SOC 的影响，同时以不同气温下车载电池容量进行计算，体现车载电池容量对 EV 充电需求的影响。每辆车 SOC_r 计算如式(18)所示。

$$SOC_r = SOC_0 - \frac{Q_H}{E} - \frac{Q_{KT}}{E} \quad (18)$$

本文提出了计及气象因素的区域 EV 充电负荷建模方法。以车载空调制冷情况为例，给出建模流程图，如图 1 所示。

- 1) 输入仿真车辆数 N_{CAR} 、 T_W 、 T_0 、 n ；
- 2) 由马尔科夫出行链与 P 矩阵计算得到 EV 的 OD 出行矩阵；
- 3) 初始化数据，令 EV 数量 $r=1$ ；
- 4) 令 $SOC_0=1$ ；由蒙特卡洛法随机抽取 T_{CX} 、 T_{FC} 、 t_{XS} 、 d 等随机变量；结合 OD 矩阵判断 EV 各时刻位置信息，根据所处区域抽取 T_s ；
- 5) 计算气象因素影响下的 E 和 Q_{KT} ；
- 6) 计算 EV 当前 SOC_r ，当 $SOC_r < 0.9$ 时电动汽车进行充电，否则令 $r=r+1$ ，返回步骤 4)；
- 7) 当 $SOC_r < 0.2$ 时选择常规充电模式，其余选择慢充模式；
- 8) 计算 EV 的充电时长与充电结束时间；
- 9) 若参与仿真车辆数已处理完毕，则对同一时段内所有充电车辆的充电功率进行叠加，否则令 $r=r+1$ ，返回步骤 4)。

3 算例分析

由 2017 年美国交通部对全美家用车辆的调查结果(National Household Travel Survey, NHTS)^[25]统计数据对 Q_{PC} 时空分布模型进行仿真，分析在适宜

气象条件下，各功能区 EV 充电负荷的分布情况；以上海市浦东新区气象数据，对计及气象因素的区域 EV 充电负荷模型进行仿真，分析在不同气象条件下 EV 充电负荷的变化情况。

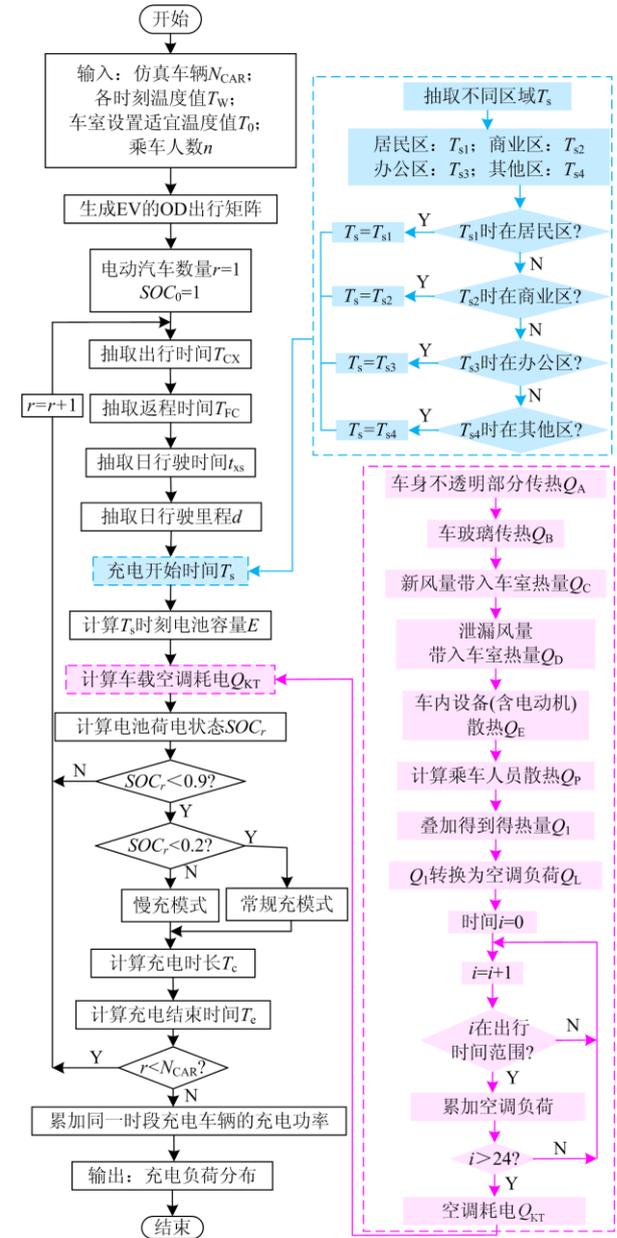


图 1 计及气象因素的区域 EV 充电负荷建模流程图

Fig. 1 Flow chart of regional EV charging load modeling considering meteorological factors

3.1 EV 动力能耗负荷仿真

由于 NHTS 数据量大，种类丰富，提供了很多用户出行规律数据，可为 EV 动力能耗负荷时空分布模型的仿真提供数据基础。因此，结合 NHTS2017^[25]，仿真参数设置如下：

- 1) 设置 $N_{CAR}=10\ 000$;
- 2) EV 常规充电模式下充电功率 p_{c1} 为 7 kW, 慢充模式下充电功率 p_{c2} 为 3.5 kW^[5];
- 3) 以 EV 比亚迪 E5 为例参与仿真。考虑到电池容量自然衰减, 设置其车载电池 $E_0=45\ \text{kWh}$, 最大续航里程 $d_0=350\ \text{km}$ 。随机参数服从的分布如表 1 所示。

表 1 EV 充电负荷模型参数设置

参数服	T_{s1}	T_{s2}	T_{s3}	T_{s4}
从分布	$N(19.5, 1.52)$	$U(9, 22)$	$N(9, 0.5)$	$U(8, 22)$

参数服	Int_{ss}	Ind	T_{CX}	T_{FC}
从分布	$N(3.02, 0.7752)$	$N(3.2, 0.882)$	$N(6.92, 1.242)$	$N(17.47, 1.82)$

由上述给定参数进行仿真, 得到 Q_{FC} 时空分布, 如图 2 所示。

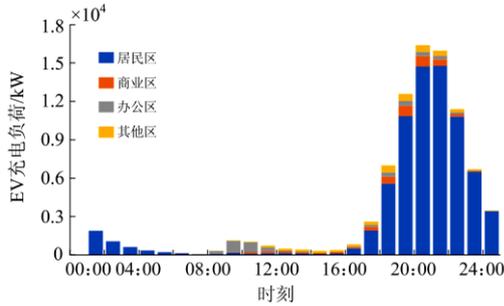


图 2 EV 动力能耗负荷时空分布

Fig. 2 Spatial and temporal distribution of EV power consumption load

由图 2 知, 从时间尺度上看, EV 充电负荷高峰出现在 18:00—23:00, 对应 EV 一天行程结束后的电量补充阶段。从时空尺度上看, 办公区 EV 充电负荷在 09:00—11:00 出现小高峰, 说明部分车主在上班早高峰后选择在工作区域充电, 大多与一些公司的电价补贴等政策有关; 而 18:00—23:00 的充电负荷高峰集中在居民区, 说明大多数车主会在一天出行任务结束后回到小区内充电。综合来看, 上述现象与日常出行习惯相符。

为了验证本文所提建模方法的有效性, 利用文献[6]所给数据进行仿真, 并对二者结果进行对比, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 在文献[6]的算例条件下, 利用本文建模方法所得充电负荷曲线与文献[6]所得结果有相似的发展趋势, 且充电负荷大小也较为接近。二者平均绝对误差为 3.6%, 曲线相关系数为 0.992, 呈高度相关。

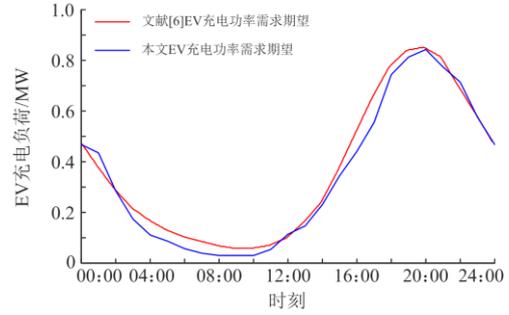


图 3 1 000 辆 EV 充电负荷分布

Fig. 3 Charging load distribution of 1000 EVs

3.2 计及气象因素的区域 EV 充电负荷仿真

基于上海市浦东新区具体气象条件, 对计及气象因素的区域 EV 充电负荷模型进行仿真。结合实际给定如下仿真参数。

1) EV 型号依旧采用比亚迪 E5, 其车身大小及车体各部分传热系数使用文献[19-20]所给数据, 车载空调负荷计算模型的参数如表 2 所示^[18,20]。

2) 对上海市气象分布情况进行调研, 由中国气象数据网国家科学数据中心所给数据^[26], 取 2019 年夏至日各时刻温度值 T_1 与冬至日各时刻温度值 T_2 分别代表高、低温环境, 如表 3 所示。由《中国气象报》知^[27], 当气温在 18~25 °C 时, 人体感觉最舒适。因此, 随机抽取 18~25 °C 内的温度值, 分别设置为高、低温环境下车室适宜温度 T_{01} 、 T_{02} 。

3) Q_1 转换为 Q_L 传递函数系数取值如下^[18]。

车体不透明部分: $v_0=0.6$ 、 $v_1=-0.39$ 、 $w_1=-0.81$;

车窗玻璃: $v_0=0.36$ 、 $v_1=-0.16$ 、 $w_1=-0.70$ 。

表 2 车载空调负荷计算模型参数设置

Table 2 Parameter setting of vehicle air conditioning

load calculation model					
参数	$P_{P-AV}/(\text{W}/\text{人})$	L/m	$n/\text{人}$	a	ρ_{FS}
设定值	116	38	2	0.89	0.08
参数	$G_c/(\text{m}^3/\text{h}/\text{人})$	$G_a/(\text{m}^3/\text{h}/\text{m})$	η		
设定值	20	10	10		

表 3 2019 年上海夏至日/冬至日各时刻温度值(单位: °C)

Table 3 Temperature values of summer solstice/winter solstice in Shanghai in 2019 (unit: °C)

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_1	28	27	27	25	25	26	27	29	29	31	31	31
T_2	6	6	6	6	6	6	7	8	8	9	10	10
t	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T_1	31	32	33	32	31	31	30	30	29	29	29	28
T_2	11	12	12	12	13	12	11	10	10	7	7	6

以 2019 年上海市夏至日/冬至日为典型日，对所建计及气象因素的区域 EV 充电负荷模型进行仿真，得到不同气象条件下全区域 EV 充电负荷的分布情况，如图 3 所示。

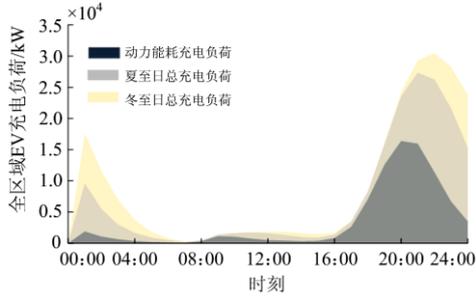


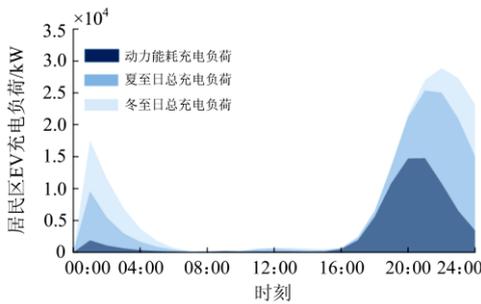
图 3 计及气象因素的全区域 EV 充电负荷对比

Fig. 3 Comparison of EV charging load in the whole region considering meteorological factors

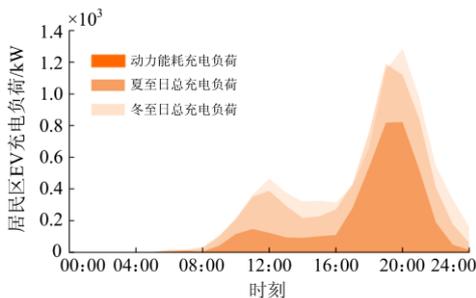
由图 3 知，全区域内高温、低温环境下，EV 充电负荷与 Q_{PC} 相比，均出现大幅增量。由此说明 EV 出行与充电行为受气象因素影响明显。与此同时，可以看出相较于高温环境，低温环境下 EV 充电负荷涨幅更大，主要是由于低温环境下 EV 车载空调耗电严重，且气温较低时车载电池容量会有明显的下降，导致 EV 续航里程大幅度减少，从而影响 EV 的充电行为，最终表现为在低温环境下 EV 充电负荷出现较大增长。

同时，在不同气象条件下对各功能区 EV 充电负荷分布情况进行仿真，如图 4 所示。

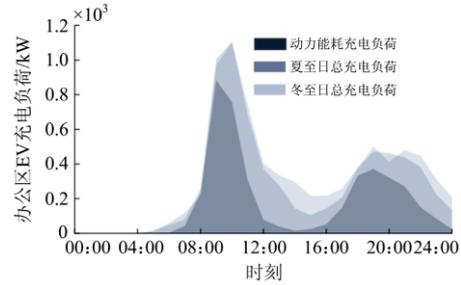
由图 4 可知，与 Q_{PC} 相比，不同气象条件下的 EV 充电负荷在各功能区均明显增加，尤其体现在



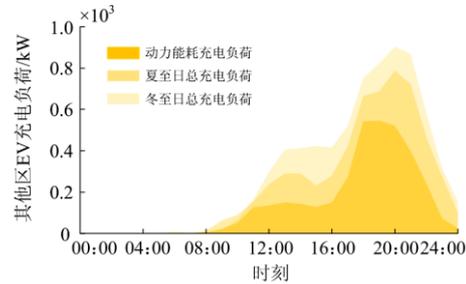
(a) 居民区EV充电负荷分布



(b) 商业区EV充电负荷分布



(c) 办公区EV充电负荷分布



(d) 其他区EV充电负荷分布

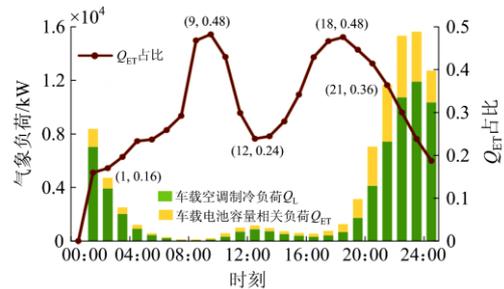
图 4 计及气象因素的各功能区 EV 充电负荷分布

Fig. 4 EV charging load distribution of each functional area considering meteorological factors

居民区。这是由于 EV 的集中充电行为在居民区较为显著，故导致居民区 EV 充电负荷出现较大涨幅。

此外，为分析 EV 充电负荷受气象因素影响的主要原因，设置气象负荷 Q_{QX} ，定义为相比于 Q_{PC} ，受气象因素影响下 EV 充电负荷的附加部分。在此对 Q_{QX} 单独进行考虑，以夏至日和冬至日为典型日分别代表高温和低温环境进行仿真，分析车载空调负荷及受车载电池容量变化影响负荷 Q_{ET} 所占比例，仿真结果如图 5 所示。

分析图 5 可知，车载空调负荷是 EV 受气象因素影响下充电负荷变化的主要因素。单独考虑 Q_{QX} 的组成部分发现，在高温和低温环境下，车载空调负荷占比极大，说明 EV 受气象因素影响主要体现在车载空调耗电上。在低温环境中，气象负荷整体高于高温环境，故可知，在低温环境下，EV 气象负



(a) 夏至日气象负荷分布

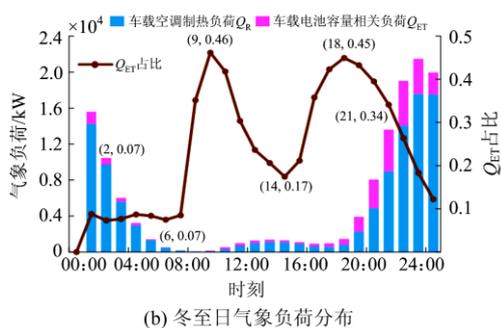


图5 EV气象负荷具体组成

Fig. 5 Specific composition of meteorological load of EV

荷受气象因素影响更为明显。这是由于当气温较高时,虽车载空调耗电严重,但同时车载电池容量会随气温升高而有所增长,相较于低温环境下,会延长EV续航里程,减少车主充电频次,因此相比于低温环境,EV充电负荷在高温环境下受影响程度较小。而当气温较低时,由于EV车载空调工作机制变化及外界气温较低等因素,车载空调负荷增长较为迅速,且低温环境下车载电池容量下降明显,导致EV续航里程的大幅度减少,影响EV的充电行为,最终导致EV充电负荷的大幅增加。

4 结论

本文分析了气温影响下车载空调耗电量,以及不同环境温度下车载电池容量变化对EV充电需求的影响,在EV动力能耗负荷时空分布模型框架上,提出计及气象因素的区域EV充电负荷建模方法。此外,还对EV气象负荷单独进行建模,分析EV充电负荷受气象因素影响的主要原因。在算例条件下,得出如下结论:

1) 本文提出的计及气象因素的区域EV充电负荷建模方法可反映不同气象条件下EV充电负荷变化情况。

2) 相较于仅考虑动力能耗的EV充电负荷,计及气象因素的EV充电负荷出现一定增量,其中车载空调耗电是EV充电负荷受气象因素影响的主要因素。在低温环境中,EV充电负荷受气象因素影响更为明显。

由于本文仿真结果主要对夏至日/冬至日两天进行仿真计算,典型日虽具有一定代表性,但还需更多数据进行验证。未来可对气象因素如何影响EV充电负荷展开更加深入的研究。

参考文献

[1] International Energy Agency. Global EV outlook 2020[R/OL]. [2020-11-27]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>.

- [2] 邱智勇, 陈贺, 高胜国, 等. 一种电动汽车充电站有序用电智能配电系统[J]. 新能源汽车供能技术, 2018, 2(1): 8-12.
 QIU Zhiyong, CHEN He, GAO Shengguo, et al. An intelligent power distribution system for EV charging station[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2018, 2(1): 8-12.
- [3] CAI H, CHEN Q, GUAN Z, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 93-107.
- [4] 李景丽, 时永凯, 张琳娟, 等. 考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 94-102.
 LI Jingli, SHI Yongkai, ZHANG Linjuan, et al. Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 94-102.
- [5] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
 LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [6] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
 TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [7] MOON H B, PARK S Y J, JEONG C H, et al. Forecasting electricity demand of electric vehicles by analyzing consumers' charging patterns[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 62: 64-79.
- [8] 常德政. 智能电网中电动汽车充电站短期负荷预测模型研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2015.
 CHANG Dezheng. Research on short term load forecasting model of electric vehicle charging station in smart grid[D]. Qingdao: Qingdao University, 2015.
- [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] 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 Xiaohui, LI Lei, LIU Weidong, 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.
- [11] 许威, 吕林, 许立雄, 等. 基于马尔可夫链的电动汽车充电需求计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 12-19.
XU Wei, LÜ Lin, XU Lixiong, et al. Calculation of charging demand from electric vehicles based on Markov chain[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(3): 12-19.
- [12] 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 Shuqiang, ZHOU Jingren, LI Zhiwei, et al. EV charging demand analysis based on trip chain theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 105-112.
- [13] 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 Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. EV charging station planning based on travel demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 34-39.
- [14] 陈丽丹, 聂涌泉, 钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 216-225.
CHEN Lidan, NIE Yongquan, ZHONG Qing. A model for electric vehicle charging load forecasting based on trip chains[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 216-225.
- [15] 吴钉捷, 李晓露. 基于实时出行需求和交通路况的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力建设, 2020, 41(8): 57-67.
WU Dingjie, LI Xiaolu. Charging load prediction of electric vehicle according to real-time travel demand and traffic conditions[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(8): 57-67.
- [16] 王海玲, 张美霞, 杨秀. 基于气温影响的电动汽车充电需求预测[J]. 电测与仪表, 2017, 54(23): 123-128.
WANG Hailing, ZHANG Meixia, YANG Xiu. Electric vehicle charging demand forecasting based on influence of weather and temperature[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(23): 123-128.
- [17] 罗浩成, 胡泽春, 张洪财. 环境温度对电动汽车充电负荷的影响分析[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 69-74.
LUO Haocheng, HU Zechun, ZHANG Hongcai. Effect analysis of ambient temperature on electric vehicle charging load[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 69-74.
- [18] 武仲斌. 考虑电动空调能耗的纯电动汽车动力传动系统参数匹配[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
WU Zhongbin. Parameter matching of electric vehicle powertrain considering energy consumption of electric air conditioner[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [19] 孙乐, 李红旗, 程睿, 等. 纯电动汽车空调系统负荷特性的试验研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(8): 1014-1018.
SUN Le, LI Hongqi, CHENG Rui, et al. An experimental study on the load characteristics of A/C system in pure electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(8): 1014-1018.
- [20] 王晓丹. 纯电动客车空调系统参数匹配与设计研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2009.
WANG Xiaodan. Research on parameter matching and design of air conditioning system for pure electric bus[D]. Jilin: Jilin University, 2009.
- [21] 张伟, 李红旗, 程睿, 等. 电动汽车空调热负荷特性研究[J]. 制冷与空调, 2016, 16(11): 53-58.
ZHANG Wei, LI Hongqi, CHENG Rui, et al. Research on heating load characteristics of air-conditioning system for electric vehicle[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2016, 16(11): 53-58.
- [22] 陈家祥, 王宜义. 空调车室传热数学模型及冷负荷计算[J]. 西安交通大学学报, 1992(1): 117-124.
CHEN Jiaxiang, WANG Yiyi. Dynamic analysis of heat transfer and calculation of its heat flux for car body[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1992(1): 117-124.
- [23] 毛华夫, 万国春, 汪镭, 等. 基于卡尔曼滤波修正算法的电池 SOC 估算[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 298-302.
MAO Huaifu, WAN Guochun, WANG Lei, et al. Estimation of battery SOC based on Kalman filter correction algorithm[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(2): 298-302.
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 电动汽车传导充电系统第 1 部分: 通用要求: GB/T 18487.1—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
China National Standardization Administration Committee. Conductive charging system of electric vehicles first parts: general requirements: GB/T 18487.1—2015[S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [25] U.S. Department of Transportation. 2017 national household travel survey[EB/OL]. [2020-11-12]. <https://nhts.orl.gov/>.
- [26] 中国天气网. 上海天气预报, 上海 7 天天气预报, 上海 15 天天气预报, 上海天气查询[DB/OL]. [2020-08-19]. <http://www.weather.com.cn/weather/101020100.shtml>.
Weather China. Shanghai weather forecast, Shanghai 7-day weather forecast, Shanghai 15 day weather forecast, Shanghai weather query[DB/OL]. [2020-08-19]. <http://www.weather.com.cn/weather/101020100.shtml>.
- [27] 宛霞. 最佳人体舒适温度是多少? [N]. 中国气象报, 2017-12-15(4).
WAN Xia. What is the best comfortable temperature for human body?[N]. China Meteorological News, 2017-12-15(4).

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-11-24

作者简介:

张琦(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车充电负荷建模; E-mail: zhangqizq2929@163.com

杨健维(1983—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电动汽车优化调度。E-mail: jwyang@swjtu.edu.cn

(编辑 许威)