

电动汽车居民区充电负荷建模分析

郭创新¹, 刘洞宇^{1,2}, 朱承治³, 王雪平², 曹 袖³

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 复旦大学 计算机科学技术学院, 上海 200433;
3. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要:提出一种基于电动汽车停车时间、充电需求等因素的电动汽车居民区充电负荷建模分析的新方法。针对电动汽车的停车行为,研究基于居民区的区域停车生成率的停车需求,建立居民区的区域停车模型。建立里程分布模型,研究电动汽车移动和电耗量的关系,建立电动汽车剩余荷电状态(SOC)模型。结合居民区的区域停车模型、荷电状态分布模型,通过详细考察居民区区域停车这一功能分区特征,综合设备性质、居民区区域特征等因素,得到居民区的电动汽车充电模型。在充电模型中包含对电动汽车电池的工况分析、电耗量分析、返程时间分布、返程时SOC分布等环节的优化分析。采用一系列的数学建模方法,完成了基于时间分布的电动汽车居民区充电负荷的相关性质研究,以此作为日后电网调度、削峰填谷的参考。以某市为算例,进行蒙特卡洛模拟和分析,得出充电负荷分布的相关结论。

关键词:电动汽车;居民区充电负荷;SOC分布;充电模型;建模

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912015

0 引言

电动汽车EV(Electric Vehicle)与周边基础设施的配套研究成为了学者及工业界重点关注的方向之一。考虑到复杂的环境,电动汽车接入电网的行为存在明显的随机性。电动汽车在居民区的充电负荷很难预测,导致充电桩的选址困难,而这种困难又影响了电网在居民区的高效调度,造成“峰上加峰”等问题。文献[1]研究了在有序和无序2种充电模式下,电动汽车给电网负荷可能带来的影响。而有序充电的前提是对充电负荷的时空分布(尤其是峰值情况)进行预测分析,并依此规划、修正充电桩的建设。对于充电桩的建设而言,除了需考虑传统意义上的预算成本、有效服务半径、路网规划等因素外,还需充分保证桩分布与域内移动负载分布相匹配^[2]。因此,较为准确地预测电动汽车在居民区等区域的充电需求,是充电设施域内空间优化的前提,同时也为分析电力系统在电动汽车接入后如何安全运转和高效调度提供了基础数据^[3]。

近年来,各国学者对电动汽车移动负载和充电需求的时空预测开展了大量的研究。文献[4]模拟建立了电动汽车功率需求的统计模型,但这种模型假设荷电状态SOC(State Of Charge)和充电时段服从一定的概率分布,而并非从汽车特性或行为本身出发;文献[5]采用蒙特卡洛方法,同样假定充电起

始时刻的SOC等满足正态分布;文献[6-7]根据电动私家车单日的行驶数据统计,估计其充电负载的大致时间分布,但未详细分析区域特征。关于电动汽车在居民区的充电也有相应的研究,文献[8]分析了电动汽车在居民区充电对电网的影响;文献[9]针对居民区提出了一种电动汽车起始充电时间的选取方法。但这些研究和相关结论并未充分利用并结合到对充电负荷的研究中。文献[10-11]对居民区内的电动汽车进行了无序充电仿真分析,但对用户的用车习惯以及日行里程并未深入考察,而是直接假设两者符合一定的经验公式分布。对于电动汽车充电负荷的分析或预测,文献[12]研究了SOC和返程时间的分布特征,并模拟了这2个随机因素,提出居民区电动汽车充电负荷的建模方法,但假设SOC服从正态分布并且返程时间服从泊松分布,不能反映真实的规律;文献[13]综合考虑了电动汽车接入电网的因素,建立了电动汽车充电功率模型,并以某居民区为例计算电动汽车接入对原负荷曲线的影响,但假设电动汽车的电池容量在某范围内呈均匀分布,同时假设每百公里电耗量恒定,这并不符合实际情况;文献[14-15]构建了居民区电动汽车的充电负荷模型,并引入充电同时率研究了峰荷叠加的问题,但同样预设了电动汽车的行驶时间、开始充电时刻及日行驶里程满足某种对数正态分布;文献[16]基于时刻充电概率预测了电动汽车的日负荷曲线,文献[17]基于峰谷电价提出了一种电动汽车在居民区利用谷时段充电的有序充电控制方法,但其中的充电时间计算模型都只与日行驶里程这一个变量相关,过于简化;文献[18]针对混合动力电动汽车改进了初始SOC的抽样方法,开始注意到SOC与里程虽近似呈

收稿日期:2019-03-25;修回日期:2019-10-22

基金项目:国家电网公司科技项目(大规模V2G网络模拟平台研究)(52110417008)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research of Large-scale V2G Network Simulation Platform)(52110417008)

线性关系但两者之间仍有一定的“分散性”。另有相关文献考虑了分时电价^[19]、多源信息^[20]等因素,尝试构建更复杂的电动汽车充电负荷计算模型。

随着相关研究的深入,今后针对居民区移动负荷的预测和研究会融入更多的因素进行综合考察。截至目前,各方工作仍停留在初级阶段,尚未给出全面、可靠的模型和方法,在诸多环节也都处理得较为粗略,与实际负荷情形往往相差甚远。①关于电动汽车的电耗量,现有研究通常假定每百公里电耗量为固定值,如文献[4]中直接假设每百公里电耗量为15 kW·h,与之不同,本文采用 ADVISOR (ADvanced Vehicle SimulatOR) 平台进行工况模拟,得到电耗量和距离关系的仿真曲线;②关于返程时间,文献[21]简化地假设电动汽车在17:00—24:00时段内最后一次出行返回,且在给定时段内的返程行为服从均匀分布,而本文通过对美国居民出行调查(NHTS)的最新数据进行取样,构建近似分布函数;③关于最后一次返程后的剩余SOC($E_{\text{SOC-D}}$),以往的文献^[22-23]或者直接假设一个 $E_{\text{SOC-D}}$ 的分布函数,或者通过经验公式估算行驶里程分布,然后再推知 $E_{\text{SOC-D}}$ 的分布,或者直接假设所有电动汽车(不论其是否已满荷)持续充电到某一固定时刻为止,而本文通过里程模型和SOC-里程关系,详细推导了 $E_{\text{SOC-D}}$,并基于此构建了充电行为函数。

综上所述,本文以电动汽车的行驶、停放、充电特性为切入点,结合针对居民区的区域性分析,力图构建一种新的、精细的电动汽车居民区行为模型,优化各细节处理,使整个建模过程更贴近实际,以提供电动汽车居民区充电负荷需求的预测分析方案。最后,以相关城市为算例进行验证和说明,为居民区充电桩的合理优化定容、电力调度、削峰填谷等提供参照依据。

1 总体思想

本文所研究的居民区充电负荷的时间分布,在根本上取决于接入居民区充电桩的电动汽车的充电选择分布。本文指出这种分布有2个决定性因素。第1个决定性因素为所选城市的土地划分及居民区所占面积比,一般地,它决定了停车行为在各特定居民区的时间特征。停车行为是充电行为的前提,因此停车模型所保证的数值范围会作为后续蒙特卡洛充电仿真的一个限定条件。第2个决定性因素为电动汽车和所接入电网设备互动时的状态、特征,在本文中即考察车辆在接入居民区充电桩时的SOC分布以及充电桩的充电功率等性质,它在很大程度上决定了车辆的充电模式和充电时长等情况。根据这两大因素,再融入居民区的区域性因素,本文得以构建完整的电动汽车在居民区的充电行为模型,并开展了后续基于时间特性的电动汽车居民区充电负荷建

模分析工作。最后,以上海市为算例,对所建负荷模型的预测能力进行了一系列的实验、分析和评价。本文详细的研究流程如图1所示。

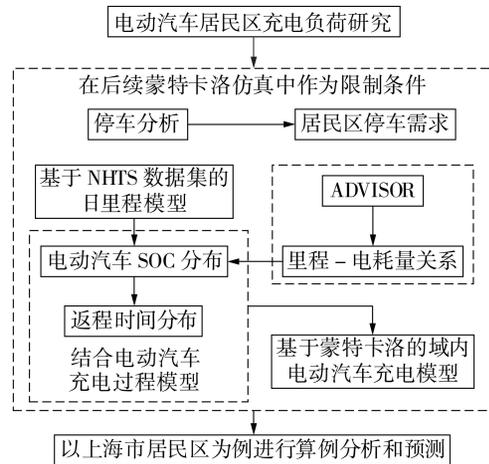


图1 电动汽车居民区充电负荷的时间性质研究流程图

Fig.1 Flowchart of studying time property of EV charging load in residential areas

根据本文思路,首先借助同规模城市电动汽车引入增长情况,采用趋势外推法^[24]可预测未来某时间(后文中选取2020年和2025年这2个时间节点)的电动汽车总保有量。其次,对目标范围进行区块划分,抽取居民区并对居民区内的停车行为进行建模,以得到居民区的停车需求。然后,考虑到SOC是电动汽车充电决策中最重要的指标,本文研究了汽车的日行驶里程分布,仿真得到电动汽车移动和电耗量的关系,构建SOC分布规律。接着,研究了居民区的区域性因素,包括居民区充电桩性质(充电模式及功率)、最后一次返程时间分布等;结合电动汽车本身的特征,构建居民区充电行为模型。最后,由保有量和居民区停车模型得到仿真总数,以充电模型作为分布函数,利用蒙特卡洛方法进行模拟,即可得到电动汽车在居民区充电负荷的时间分布。

2 居民区停车分析

停车生成率是指某时刻单位建设用地所产生的停车需求,是估算单一性质用地停车需求的重要指标^[25],尤其在“点需求”模型、不考虑周边高速路配电网的场景中应用广泛^[26]。不同类型用地的停车生成率有显著的差异,单一功能用地的停车生成率乘以对应的面积就可得到域内该类型用地的停车需求估计值^[20]。通常停车生成率根据市政规划和相应的文献数据估算得到,在实际建模分析中需做出修正。

正如文献[27]中指出的,静态停车生成率的建模价值很有限,无论是峰值还是均值,都无法反映电动汽车停放在各时间段的变化,故需要引入传统方法中缺失的时间维度。本文使用标幺值曲线^[27-28],该曲线用以表征特定用地停车需求的时间分布特

征。设当前研究的土地类型为*i*,城市中或目标范围内总计有*n*处*i*类型用地,则基于区域停车生成率的停车需求模型可以表示为:

$$D_i(t) = \sum_{j=1}^n \theta_{ij} F_i(t) G_i S_{ij} \quad (1)$$

其中, $D_i(t)$ 为目标区域内所有*i*类型用地在*t*时刻的停车需求总量; G_i 为*i*类型用地的预估区域停车生成率, $F_i(t)$ 为*i*类型用地的区域停车需求随时间变化的标么值曲线,由 $F_i(t)G_i$ 可得到区域内各单一功能用地*i*在*t*时刻的单位面积停车生成需求; S_{ij} 为对应居民区用地的有效面积; θ_{ij} 为居民区用地的停车生成率修正系数,该系数综合考虑了所在居民区的区域优势度、经济水平、人口密度、规划情况、分布特点等城市学性质。

实际划分中,在原先土地类别的基础上需考虑将某些特殊性质的居民区进行合并,如将高档居民区、拆迁安置区归到居民区中。对于居民区用地类型 I_s ,目标范围内总计有*N*处,设*t*时刻居民区的停车需求总量为 $D_{I_s}(t)$,则由式(1)得:

$$D_{I_s}(t) = \sum_{j=1}^N \theta_{I_s j} F_{I_s}(t) G_{I_s} S_{I_s j} \quad (2)$$

其中,对于居民区标么值曲线 $F_{I_s}(t)$ 而言,本文选取文献[22]中通过统计典型居民区停车需求得到的标么值函数,如式(3)所示。

$$F_{I_s}(t) = 1 - 0.54 \exp \left[- \left(\frac{t - 15.07}{5.84} \right)^2 \right] - 0.24 \exp \left[- \left(\frac{t - 9.68}{2.46} \right)^2 \right] \quad (3)$$

需要注意的是,上述模型中的需求总量 $D_{I_s}(t)$ 主要受居民区本身的性质制约。如今城市发展迅猛,停车生成率预计有时无法体现全部情况;因此,除了确定居民区区域停车生成率外,还可以对泊位供需情况进行实地调研考察,以降低与实际需求的出入。在本文的居民区建模中,为了简化计算,暂不考虑泊位紧张、需排队充电的情况。

3 SOC分析

在进行电动汽车充电行为建模前,首先需要分析对这一行为的影响因素。电动汽车的充电选择是一个实时的用户决策过程;在实际场景中,用户主体包括驾驶者、电动汽车自动充电中间件或相应车载智能设备。显然,充电决策受多因素影响,如车辆性质、设备性质、电池特性和当下SOC、停车场所的状况以及居民区的充电特征等。理论和实证都表明,在各种因素中,电池当前的SOC和充电方式选择具有很强的统计相关性,也是用户决策最重要的考虑因

素,因此本节将通过建模得到电池SOC的分布函数。

3.1 里程模型

当电动汽车类型和电池类型确定时,用户的日行驶里程是该电动汽车SOC的决定因素,两者呈负相关关系。考虑到普通燃油汽车和新能源车在行驶上没有本质区别,可以直接分析一般家用车的日行驶数据。目前国内尚未建立可回溯追查的大样本交通数据库,相关数据存在空缺。因此学界通常借鉴国外的数据进行相似分析[4];但诸多研究[21,29]所采用数据的时效性已过,需要重新采集分析。本文数据取自美国联邦公路管理局(FHWA)在其网站上公布的2017年和2018年的NHTS[30],统计结果见图2。

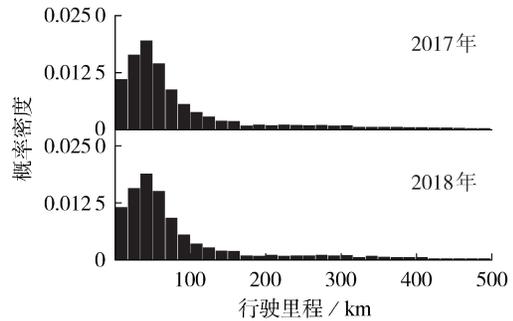


图2 日行驶里程的统计直方图

Fig.2 Statistical histogram of daily mileage

根据上述数据,以d为单位,有15%的车辆未使用,43.7%的车辆的日行驶里程在30 km以内,86.4%的车辆的日行驶里程在100 km以内。在进行进一步分析前,剔除其中的坏数据和无用数据并进行归一化处理,然后运行随机数算法选取一个占比为5%、总样本数为*q*的子样本。设总集为 S_T ,则所取样本集为 $S_z = \{x_1, x_2, \dots, x_q\} \subseteq S_T$ 。然后,采取极大似然参数估计法,用对数正态累积分布函数拟合家用汽车日行驶里程的累积分布情况。经拟合,可得日行驶里程*x*(单位为km)的概率密度函数见式(4)。

$$f_d(x) = \frac{8}{5x\sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{[\ln(5x) - 3 \ln 2 - \mu_d]^2}{2\sigma_d^2} \right\} \quad (4)$$

其中, $\mu_d = 3.58$; $\sigma_d = 0.89$ 。日行驶里程的拟合函数如图3所示。

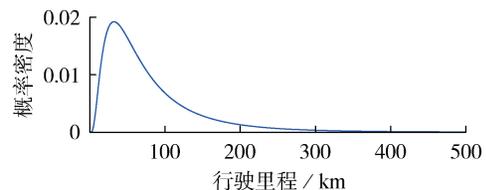


图3 日行驶距离的拟合函数

Fig.3 Fitting function of daily mileage

3.2 移动和电耗量关系模型

完成日行驶里程建模后,需要进一步研究电动

汽车移动和电耗量的关系。研究者通常假定每百公里电耗量 C_n 为某固定值(如文献[4]中假设其为 $15 \text{ kW}\cdot\text{h}$)。显然,这与实际情况并不相符。

本文选取 ADVISOR 仿真平台进行模拟建模。ADVISOR 是由美国国家可再生能源实验室 NREL (National Renewable Energy Laboratory) 研发的,该平台上的模型按照实际动力系统搭建,基于 MATLAB/Simulink 环境。对于电动汽车的动力性能仿真,ADVISOR 采用混合仿真方法,具有计算量较小、运算速度快、结果精度高等优势^[31]。

对于模拟实验中的工况选择,目前性能评价主要采用 CYC_ECE_EDUC (欧洲城市工况)、CYC_UDDS (美国工况) 和 CYC_ECE_HWFET (高速公路工况) 这 3 种循环工况。我国主要是以 CYC_ECE_EDUC 循环工况为主^[32]。因此,本文的实验仿真选择在 CYC_ECE_EDUC 工况下进行。该循环工况假设全程道路通畅,各参数选择依照系统的默认值:时间为 1225 s ,距离为 10.05 km ,最大速度为 120 km/h ,平均速度为 32.5 km/h ,怠速时间为 340 s ,停车次数为 12 次。实验的其他关键参数如下:整车的总长、总宽、总高分别为 2750 、 1780 、 1300 mm ,额定乘客数为 5 人,滑动阻力系数为 0.013 ,风阻系数为 0.335 ,迎风面积为 2 m^2 ,整车装备质量为 1145 kg ,轴距为 2.6 m ,轮胎滚动半径为 275 mm ,质心高度为 0.5 m ,蓄电池单块电压为 12 V ,蓄电池单元数量为 25 个,电动机额定功率为 75 kW 。

ADVISOR 仿真实验依照传动系统的功率需求建立蓄电池模型,该模型可以实时计算蓄电池的电压、电流和 SOC。对于电流计算子模块,根据 Kirchhoff 定律和电流功率求解二次方程可得电流 I ; 然后根据 SOC 计算子模块,定义电池 SOC^[33] 如式(5)所示,根据式(5)可对 SOC 进行仿真计算。

$$B_{\text{SOC}} = 1 - \frac{\int_0^t \eta I(t) dt}{C_n} \quad (5)$$

其中, C_n 为额定容量; η 为库伦效率。

该实验配置了 3 种类型的电动汽车,各类型电动汽车的整车参数均与系统默认值保持一致,区别在于不同类型电动汽车的电池容量和百公里平均电耗量有所差异; 3 种型号电动汽车的参数设定参照了市面上几种热销电动私家车品牌的能耗数据^[12]。其中,对于 A 类型汽车而言,其电池容量为 $80 \text{ kW}\cdot\text{h}$,百公里平均电耗量为 $18.4 \text{ kW}\cdot\text{h}$; 对于 B 类型汽车而言,其电池容量为 $75 \text{ kW}\cdot\text{h}$,百公里平均电耗量为 $17.4 \text{ kW}\cdot\text{h}$; 对于 C 类型汽车而言,其电池容量为 $70 \text{ kW}\cdot\text{h}$,百公里平均电耗量为 $15.8 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。在 CYC_ECE_EDUC 工况下,生成并绘制 3 种类型电动汽车的 SOC-里程曲线,如图 4 所示,并拟合得到 SOC 和里程的一般函

数关系式 $B_{\text{SOC}} = Y_{\text{CYC_ECE_EDUC}}(P_d)$ 。

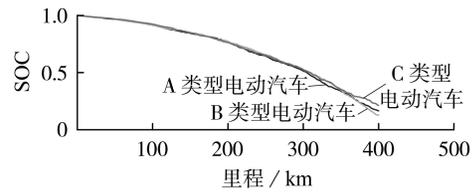


图4 CYC_ECE_EDUC 工况下 SOC-里程的仿真曲线

Fig.4 Simulation curves of SOC-distance under CYC_ECE_EDUC working condition

同样地,通过仿真可得到 3 种类型电动汽车在 CYC_UDDS 和 CYC_ECE_HWFET 这 2 种工况下的 SOC-里程曲线,以作后续分析参考。参数设定为 ADVISOR 平台缺省值,结果见附录中的图 A1。

3.3 SOC 概率密度分布

对于实验中所选取的电池类型,本文将其默认为锂离子电池。相较于铅酸、镍氢等材料,锂离子电池具有能量密度高等优势,被普遍应用于电动汽车储能。设该类型电池正常耗电的低端阈值为 G_T ,以一天为单位充分行驶后电池的余量 SOC 为 E_{SOC} 。在模型中,须始终保证实时余量高于 G_T ,否则该车就需紧急停靠充电。在得到实验工况下一般车型 SOC 和里程关系 Y 后,通过式(4)即可计算得到 SOC 的概率密度函数为:

$$f(E_{\text{SOC}}) = \frac{1}{Y^{-1}(E_{\text{SOC}}) \sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln Y^{-1}(E_{\text{SOC}}) - \mu_d]^2}{2\sigma_d^2}\right\} \quad (6)$$

其中, $\mu_d = 3.58$; $\sigma_d = 0.89$ 。综上,可得到 SOC 的分布情况,避免了以往的研究中人为地引入一个百公里电耗量 W_{100} 所带来的问题和不准确。

4 居民区充电负荷分析

本节将结合上文中的各模型对电动汽车在居民区的充电负荷进行时域分析。需要特别说明的是,为了简化模型,本文暂不考虑电动汽车该日在居民区以外的其他区域有应急充电的行为。

首先,需要估计电动汽车在这一居民区的大致返程时间分布。有研究^[21]假设电动汽车在 17:00—24:00 时段最后一次返回家中,且在给定时段内的返程概率服从均匀分布,这与实际情况不符。本文对 NHTS 最新数据^[30]进行取样,并以该数据作为真实分布的近似。与前文类似,对数据进行归一化处理,采用极大似然估计法将电动汽车最后行程的返回时刻近似为正态分布与对数正态分布,经绘制如图 5 所示。

考虑居民区的特性,起始充电时刻即认为是最后一次出行的返回时刻。且考虑到居民区的充电设备相对充裕,供需情况较为简单(对停车性质的研究

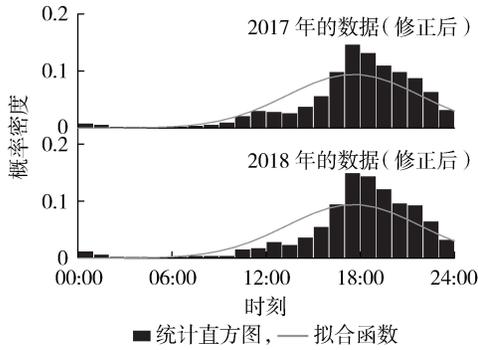


图5 最后一次返程时间的概率分布

Fig.5 Probability distribution for return time of last trip

较为方便),因此不必引入排队模型。那么,开始充电时刻满足如下正态分布,其概率密度函数为:

$$f_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & \mu_s - 12 < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x+24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & 0 < x \leq \mu_s - 12 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\mu_s = 17.9$; $\sigma_s = 3.4$ 。

对于家用通勤类汽车而言,其最后一次返程后的剩余SOC($E_{\text{SOC-D}}$)是居民区充电特征和负荷消耗的核心因素。在以往的文献中,研究者或直接假设一个 $E_{\text{SOC-D}}$ 的分布函数,或通过经验公式估算得到行驶里程分布,再推知 $E_{\text{SOC-D}}$ 的分布,或直接假设所有电动汽车不论是否已满荷,其持续充电到一个固定时刻为止^[22-23]。而这些方案显然都和现实情况不符。设在交互的全过程中,充电设施接口和电池管理系统正常连接,充电模式恒定不变,且不考虑电动汽车入网(V2G)的放电过程。现将充电过程近似为恒功率特性,将电池充至满荷所花费时间设为 T_{full} ,则有:

$$T_{\text{full}} = \frac{(1-E_{\text{SOC-D}})^S}{P_c \eta_c} \quad (8)$$

其中, S 为标准规格下锂电池的容量,设其满足25~35 kW·h范围内的均匀分布; P_c 为锂电池的额定充电功率; η_c 为充电效率。根据经验,设在0.1 C充电电流倍率下,与锂电池容量的分布相同,各电动汽车的充电功率服从[2,3] kW范围内的均匀分布^[4],即:

$$f_{P_c}(x) = \begin{cases} 1 & x \in [2, 3] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

综合上述模型,假定 $E_{\text{SOC-D}}$ 、 P_c 两者相互独立,并假定任何 $E_{\text{SOC-D}}$ 下均接入设备充至满荷状态,则联立式(6)~(9)计算得到充电时长的概率密度函数为:

$$f_t(x) = 4.14 \int_{k_1}^{k_2} 0.11x \exp\left(\frac{\ln x + \ln p - 2.16}{1.58}\right) dp \quad (10)$$

其中, $x > 0$; $k_1 = 2$, $k_2 = 3$ 。

对于在居民区充电的单辆电动汽车而言,设其起始充电时刻和充电时长两者相互独立,两者的联合概率密度函数 f_{st} 如式(11)所示。

$$f_{st} = f_s f_t \quad (11)$$

其中, f_s 为起始充电时刻的概率密度函数; f_t 为充电时长的概率密度函数。定义随机变量 ξ_{t_0} ,若某车在 t_0 时刻正在充电,则有 $\xi_{t_0} = 1$,反之 $\xi_{t_0} = 0$ 。于是可以通过 f_{st} 得到在 t_0 时刻该车是否在充电的布尔值。然后设在居民区充电的单辆电动汽车在 t_0 时刻的功率需求为 P_{t_0} ,那么有:

$$P_{t_0} = \xi_{t_0} P_c \quad (12)$$

值得注意的是,上述各式中不存在解析解。可以考虑采用蒙特卡洛模拟法得到 P_{t_0} 在一天中各时刻的期望 $\mu_c(t_i)$ 与标准差 $\sigma_c(t_i)$,各时间点取 M_d ($M_d > 10000$)个样本,重复5次实验后得到最终的结果。设一天内总计有 N_d 辆电动汽车会回到居民区 I_s ,接入充电桩的电动汽车为 N_b 辆,根据前文基于区域停车生成率的需求模型及式(2)可得:

$$N_b \leq N_d = \int D_{I_s}(t) dt \quad (13)$$

通过中心极限定理可以知道,在某一时刻 t_i , N_b 辆电动汽车的总体功率需求呈高斯分布,其期望为 $N_b \mu_c(t_i)$,方差为 $N_b \sigma_c^2(t_i)$ 。对于一高斯分布 $N(\mu, \sigma)$,随机变量落在 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 范围内的概率为99%。故可用该置信区间估计功率上下限,同时可以绘制出 N_b 辆电动汽车功率需求的期望曲线。

5 算例分析

作为一种基于蒙特卡洛模拟的“需求侧”分析,本文所建模型属于一种宏观的、稳定长期型方案,因此选取未来时间节点进行预测符合模型特征^[27]。本节首先采取第4节建立的居民区充电模型,尝试对上海市2020年及2025年居民区电动汽车的充电负荷进行相应的预测和分析。

上海市经济和信息化委员会的公开数据显示,2017年上海全市的电动汽车达到16.55万辆;截至2017年12月底,上海市充电设施管理平台共计接入充换电设施13万个,包括2.6万个公共充电桩、2.1万个专用充电桩和8.3万个私人充电桩。参阅《上海市电动汽车充电基础设施专项规划(2016—2020年)》,到2020年,全市电动汽车及其他新能源汽车的总量将达到26.3万辆,电动私家车保有量将超过17.5万辆;各新能源充电设施届时将达到21.1万个。

同时,基于《电动汽车在上海市电力系统中的应用潜力研究》(下文简称《研究》)报告的调研分析和预估,本文整理得到2020年及2025年上海市电动汽车负荷曲线的测算值。由巴斯(Bass)扩散模型,设 $n(t)$ 为第 t 年新增加的电动汽车数,则有:

$$n(t) = a(m - N(t)) + \frac{b}{m} N(t)(m - N(t)) \quad (14)$$

其中, $N(t)$ 为第 t 年累计的电动汽车数; m 为最大市场潜力; a 为创新系数(表征外部影响); b 为模仿系数(表征内部影响)。考虑到上海市现行机动车限号以及财税扶持政策具有不确定性, 本文提出“常规场景”和“高速场景”这2种电动汽车发展场景。其中“常规场景”依照过去5年电动汽车的销量历史统计和2020年及2025年的规划量进行拟合, 可以得到 $a=0.01$ 、 $b=0.08$ 。另外, 根据《中国2050高比例可再生能源情景及路径》等报告, 考虑到动力电池成本下降等因素, 报告提出电动汽车销量增速更可观的“高速场景”下 $a=0.01$ 、 $b=0.15$ 。例如, 在“高速场景”下, 考虑电动汽车满足随机充电条件, 依报告测算, 全市区电动汽车的充电负荷高峰为6.33 GW, 出现于19:00左右, 充电负荷低谷为15 MW, 出现于04:00左右。通过报告即可得到2020年及2025年上海全市夏季工作日(6—9月, 周一至周五)各场所的私家电动汽车充电负荷规划预估值, 并依照充电桩类型、电动私家车所占比重换算得到居民区充电数据分布。《研究》中的预估数据基于对上海市的大样本调研以及对历史数据的分析测算, 其中原始数据取自上海市经济和信息化委员会、上海市新能源汽车数据采集与检测研究中心、上海市电力公司等机构; 另外, 《研究》报告对上海市电动汽车充电负荷的增速趋势进行了多维度的考察分析, 其作为一种前瞻性的未来负荷预测具有一定参考价值。因此, 本文选取该报告数据作为与模型预测值对标的基准数据。

同时, 根据以上数据, 查阅《上海市城市总体规划(2017—2035年)》(下文简称《规划》)《上海市控制性详细规划技术准则(2016修订版)》等市政文件, 综合文献数据^[27], 估算2020年及2025年上海市居民区用地占地面积、居民区平均容积率(除去容积率低于0.7的别墅区)、平均泊位建设标准(停车生成率)等指标。因所掌握的算例数据有限, 在本文计算中暂不考虑式(2)中参数 $\theta_{i,j}$ 的影响, 设 $\theta_{i,j}=1.0$ 。综合而言, 确定式(2)中各参数, 得到确定的居民区停车模型。再结合式(6)—(12), 代入各参数值, 并假定式中所表征的过程符合国家标准 GB/T 20234.2—2011《电动汽车传导充电用连接装置》规定, 其他充电特性符合上文设定, 得到居民区的充电模型。确定式(12)后进行蒙特卡洛模拟, 得到域内单辆电动汽车的充电时间分布; 然后重复仿真抽样, 总仿真次数为届时电动汽车总数且满足式(13)所示约束; 最后进行累加, 得到一天中区域内总负荷的时间分布。

图6给出了2020年及2025年夏季工作日一天内电动汽车在居民区充电负荷的预测值和2种发展场景下的充电负荷参考值。本节分析了3个区块, 即上海全市、上海市主城区、上海市中央活动区; 该

3个区块依据《规划》划定范围, 假设区域内电动汽车的比例及充电行为服从均匀分布, 并假定电动汽车充电过程正常, 不考虑电价波动, 持续充至满荷, 将单辆电动汽车在一天内的仿真实验数据进行累加, 3个区块的结果分别如图6(a)—(c)所示。

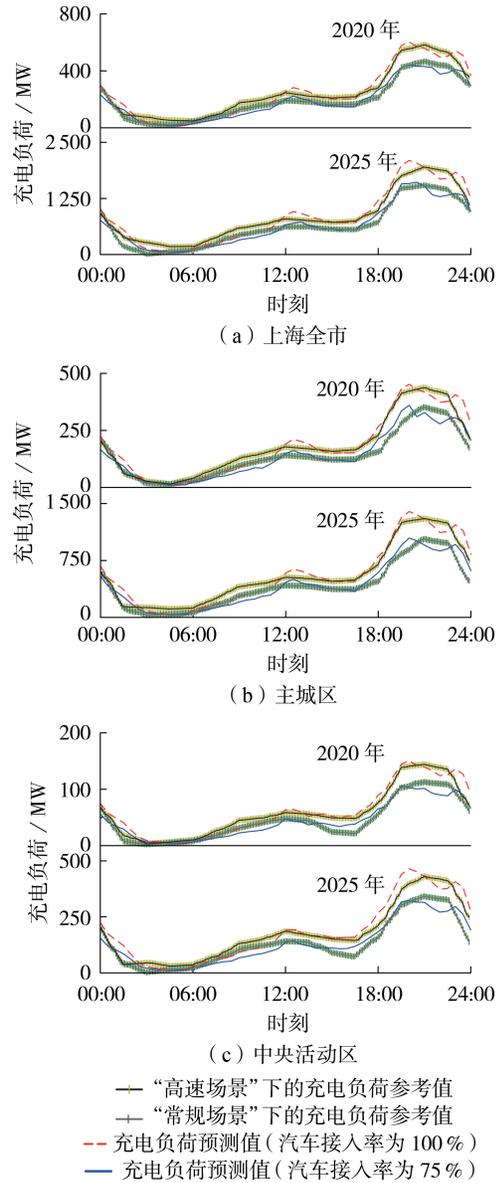


图6 2020年和2025年上海全市、主城区、中央活动区的居民区工作日充电负荷预测曲线

Fig.6 Daily charging load forecasting curves of residential area in total Shanghai, main urban area and central activity area in 2020 and 2025

本文采取点预测值平均绝对百分比误差(MAPE)这一指标来衡量模型的预测能力^[34]。定义式(15)所示 δ 用于评价模型数据与调研测算的相对偏差。

$$\delta = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \left| \frac{\tilde{P}_k - P_k}{P_k} \right| \times 100\% \quad (15)$$

其中, \tilde{P}_k 、 P_k 分别为第 k 个时刻点的模型预估值、调研

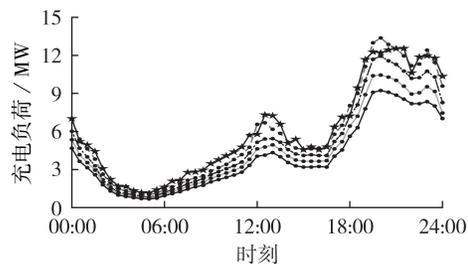
测算值; M 为总时刻数。不同情景下的 δ 值见表1。

表1 不同情景下的 δ 值

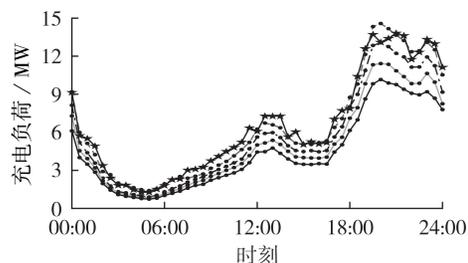
Table 1 Values of δ under different scenes

汽车接入率/%	区块	δ /%			
		2020年		2025年	
		“高速场景”	“常规场景”	“高速场景”	“常规场景”
100	上海全市	8.5	20.2	12.1	25.3
	主城区	7.8	17.5	11.0	21.7
	中央活动区	6.2	15.8	9.6	19.4
75	上海全市	18.9	6.9	23.7	9.2
	主城区	16.4	6.4	18.0	8.8
	中央活动区	12.5	4.1	14.3	7.6

另外,为了展示模型在当下的实际分析效果,本文提取了上海市中央活动区的土地分布及区域内居民小区的负荷情况,数据取自2018年6—9月间工作日的电动汽车充电桩负荷记录。将研究区域化分为若干个小块(划分示意图见附录中的图A2,其中浅黄色标识地块即为居住用地),假设在区域内电动汽车的比例及充电行为服从均匀分布,并假定充电正常、不考虑电价波动、持续充至满荷,通过模型模拟得到区域1和区域2这2个小块当汽车接入比例分别为70%、80%、90%、100%时,电动汽车在居民区的充电负荷,并与区域内充电桩实际充电负荷的平均值进行比较,结果如图7所示。



(a) 区域1



(b) 区域2

--- 汽车接入比例为100%, --- 汽车接入比例为90%
 - - 汽车接入比例为80%, - 汽车接入比例为70%
 * 充电桩实际充电负荷的平均值

图7 区域1和区域2居民区电动汽车日充电负荷曲线

Fig.7 Daily EV charging load curves of residential area in District 1 and 2

6 结论

本文通过研究城市土地分类及相关性质,得到

区域性停车生成率,并基于此对目标城市或限定范围内电动汽车的居民区停车行为进行建模。同时,研究私家通勤车日行驶里程模型,分析电动汽车移动和电耗量的关系,得到电动汽车SOC的概率密度分布模型。然后,研究电动汽车在居民区的区域性充电特征,结合上述模型,构建了一个典型城市居民区内电动汽车充电负荷的时间性质模型。

最后,以上海市为算例进行分析和预测。本文实验依据《规划》的区域划定,分别研究预测了2020年上海全市、主城区及中央活动区的居民区域在一天内电动汽车充电负荷的分布情况。

通过绘制并比较模型输出与对应调研测算数据,可知模型在汽车接入率为100%时的预测值较贴合“高速场景”增长模式,在汽车接入率为75%时较贴合“常规场景”增长模式。通过MAPE评估容易得到,本文模型能够方便、有效地预测城市电动汽车充电负荷的时空分布。结果表明,模型数据与调研测算的负荷曲线走势一致:充电负荷在早间处于低谷段,午间有一个小波峰,午后回落,到傍晚开始拉升,直到夜间充电负荷达到峰值,随后再次缓慢下降,到凌晨回到谷值。同时,为了检验模型在当下的分析能力,本文还选取了上海市中央活动区的2个典型地块的居民区进行区域分析、仿真。结果表明,模型可以较好地拟合一天内2处居民区电动汽车充电负荷的实际走势和峰谷情况。在下一步的研究中,笔者将考虑诸如电动汽车在其他居民区存在停车充电的情形,使该分析模型得到进一步的完善。一个城市居民区的充电负荷和区位特征息息相关,尤其是面积、人口、经济水平等;在下一步的工作中笔者将对其他城市居民区推广和测试本文所提方法。

综上所述,通过掌握这一系列特征,结合模型和调研,决策者可以更快地服务于电力在城区内的统一调度,提高电网削峰填谷、高效运转的能力;同时,该模型分析也能为今后居民区充电桩的规划选址、定容优化提供重要的参考,这也将是今后的研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] BRADLEY T H, QUINN C W. Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(16): 5399-5408.
- [2] 康继光, 卫振林, 程丹明, 等. 电动汽车充电模式与充电站建设研究[J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(5): 64-66.
KANG Jiguang, WEI Zhenlin, CHENG Danming, et al. Research on electric vehicle charging mode and charging stations construction[J]. Power Demand Side Management, 2009, 11(5): 64-66.
- [3] 郑陈权. 城市电动汽车充电设施最优选址研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.

- ZHENG Chenquan. The optimal location research of city electric vehicle charging stations[D]. Nanchang:Nanchang University,2016.
- [4] 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.
- [5] ASHTARI A,BIBEAU E,SHAHIDINEJAD S,et al. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(1):341-350.
- [6] DARABI Z,FERDOWSI M. Plug-in hybrid electric vehicles: charging load profile extraction based on transportation data [C]//Power and Energy Society General Meeting. Detroit,MI, USA:IEEE,2011:1-8.
- [7] SHAHIDINEJAD S,FILIZADEH S,BIBEAU E. Profile of charging load on the grid due to plug-in vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(1):135-141.
- [8] 陈雷,卢斯煜. 电动汽车充电对住宅小区配电网的影响研究[J]. 南方能源建设,2018,5(1):51-58.
CHEN Lei,LU Siyu. Research on the influence of electric vehicle charging on distribution network of residential district [J]. Southern Energy Construction,2018,5(1):51-58.
- [9] 王毅,王飞宏,侯兴哲,等. 住宅区电动汽车充电负荷随机接入控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):53-58.
WANG Yi,WANG Feihong,HOU Xingzhe,et al. Random access control strategy of charging for household electric vehicle in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(20):53-58.
- [10] 邹念佐,程凡华,严方彬. 居民小区内电动汽车充电负荷的仿真分析[J]. 通信电源技术,2017,34(4):64-65,69.
ZOU Nianzuo,CHENG Fanhua,YAN Fangbin. Simulation analysis of electric vehicle charging load in residential quarters [J]. Telecom Power Technology,2017,34(4):64-65,69.
- [11] 钟小强,王天云,麦鸿坤. 面向居民区电动汽车充电负荷预测与容量配置研究[J]. 电测与仪表,2018,55(23):54-59.
ZHONG Xiaoqiang,WANG Tianyun,MAI Hongkun. Research on charge load forecast and capacity allocation of electric vehicle for residential area[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(23):54-59.
- [12] 蒋建东,韩文文,苑子俊,等. 居民区电动汽车充电负荷建模研究[J]. 郑州大学学报(理学版),2019,51(1):73-77.
JIANG Jiandong,HAN Wenwen,YUAN Zijun,et al. The modeling of electric vehicle charging load in residential areas[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition),2019,51(1):73-77.
- [13] 戴鹏,顾丹珍,付慧敏. 基于概率统计的电动汽车充电功率建模[J]. 电源技术,2015,39(7):1469-1472.
DAI Peng,GU Danzhen,FU Huimin. A charging load model based on probability and statistics for electric vehicles [J]. Chinese Journal of Power Sources,2015,39(7):1469-1472.
- [14] 郭毅,胡泽春,张洪财,等. 居民区配电网接入电动汽车充电能力的统计评估方法[J]. 电网技术,2015,39(9):2458-2464.
GUO Yi,HU Zechun,ZHANG Hongcai,et al. A statistical method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load[J]. Power System Technology,2015,39(9):2458-2464.
- [15] 杨冰,王丽芳,廖承林,等. 含有耦合特性的电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):76-82.
YANG Bing,WANG Lifang,LIAO Chenglin,et al. Charging load calculation method of large-scale electric vehicles with coupling characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(22):76-82.
- [16] 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):207-213.
WANG Haolin,ZHANG Yongjun,MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(3):207-213.
- [17] 苏海锋,梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):17-22.
SU Haifeng,LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):17-22.
- [18] 周念成,熊希聪,王强钢. 多种类型电动汽车接入配电网的充电负荷概率模拟[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):1-7.
ZHOU Niancheng,XIONG Xicong,WANG Qianggang. Simulation of charging load probability for connection of different electric vehicles to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):1-7.
- [19] 张振夫,黄小庆,曹一家,等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):24-29.
ZHANG Zhenfu,HUANG Xiaoqing,CAO Yijia,et al. Charging load calculation considering TOU for electric vehicles [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):24-29.
- [20] 陈丽丹,张尧,ANTONIO Figueiredo. 融合多源信息的电动汽车充电负荷预测及其对配电网的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):1-10.
CHEN Lidan,ZHANG Yao,ANTONIO Figueiredo. Charging load forecasting of electric vehicles based on multi-source information fusion and its influence on distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):1-10.
- [21] 王辉,文福拴,辛建波. 电动汽车充放电特性及其对配电系统的影响分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2011,38(5):17-24.
WANG Hui,WEN Fushuan,XIN Jianbo. Charging and discharging characteristics of electric vehicles as well as their impacts on distribution systems[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2011,38(5):17-24.
- [22] CLEMENT-NYNS K,HAESSEN E,DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):371-380.
- [23] GREEN R C,WANG L F,ALAM M. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks:a review and outlook[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2011,15(1):544-553.
- [24] 刘飞. 北京电动汽车充电站布局规划研究[D]. 北京:北京物资学院,2015.
LIU Fei. Research on Beijing electric vehicle charging station layout planning[D]. Beijing:Beijing Wuzi University,2015.
- [25] 骆豪. 城市综合体共享停车需求预测方法研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2017.
LUO Hao. Research on the method of forecasting shared-parking demand in urban complex building [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology,2017.
- [26] 唐会. 重庆市电动汽车充电站布局研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
TANG Hui. Research on layout of electric vehicle charging station in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University,2016.

- [27] 张洪财,胡泽春,宋永华,等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(1):13-20.
ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [28] 王瑞. 基于用地区位分析的停车需求预测研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.
WANG Rui. Research on parking demand forecast based on land location analysis[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [29] TAYLOR J, MAITRA A, ALEXANDER M, et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations [C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, Canada:IEEE, 2009: 1-6.
- [30] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2018 national household travel survey[EB/OL]. [2019-03-20]. <http://nhts.ornl.gov>.
- [31] 王兴,秦东晨,裴东杰. 电动汽车动力性能仿真分析[J]. 机械设计与制造,2012(12):114-116.
WANG Xing, QIN Dongchen, PEI Dongjie. Simulation and analysis of dynamic performance of electric vehicle [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(12): 114-116.
- [32] 刘成武,念健. 纯电动汽车动力系统参数匹配及动力性能仿真[J]. 海峡科学,2010(12):68-71.
LIU Chengwu, NIAN Jian. Parameter matching and dynamic functions simulation of electric vehicle power system [J]. Channel Science, 2010(12): 68-71.
- [33] 林成涛,王军平,陈全世. 电动汽车SOC估计方法原理与应用[J]. 电池,2004,34(5):376-378.
LIN Chengtao, WANG Junping, CHEN Quanshi. Methods for state of charge estimation of EV batteries and their application [J]. Battery Bimonthly, 2004, 34(5): 376-378.
- [34] 颜伟,李丹,朱继忠,等. 月前日负荷曲线的概率预测和随机场景模拟[J]. 电力系统自动化,2017,41(17):155-162.
YAN Wei, LI Dan, ZHU Jizhong, et al. Probabilistic forecasting and stochastic scenario simulation of month-ahead daily load curve [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 155-162.

作者简介:



郭创新

郭创新(1969—),男,浙江杭州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为能源互联网运行与规划、风险调度、新能源接入等(E-mail:guochuangxin@zju.edu.cn);

刘洞宇(1995—),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要研究方向为智能电网(E-mail:17210240155@fudan.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Modeling and analysis of electric vehicle charging load in residential area

GUO Chuangxin¹, LIU Dongyu^{1,2}, ZHU Chengzhi³, WANG Xueping², CAO Xiu³

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. School of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200433, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: A new method for modeling and analyzing the electric vehicle charging load in the residential area is proposed, which is based on the factors of parking time and charging demands of electric vehicles, and so on. Aiming at the parking behavior of electric vehicles, the parking demand is studied based on the regional parking generation rate of residential areas, and the regional parking model of residential areas is established. The travelled distance distribution model is established, and the relationship between the movement and power consumption of electric vehicles is studied, then the residual SOC (State Of Charge) model is established. Combining the regional parking model of residential areas with the SOC distribution model, the charging model of electric vehicles in residential areas is obtained through the detailed investigation of the regional parking features in residential areas and the integration of equipment properties, regional characteristics of residential areas and other factors. The charging model includes the optimization analysis of working condition of electric vehicle battery, power consumption, return time distribution, SOC distribution of return trip, and so on. A series of mathematical modeling methods are adopted to complete the research on relevant properties of electric vehicle charging load in residential areas based on time distribution, which can be used as a reference for future power grid scheduling and peak-load shifting. Taking a city as an example, Monte Carlo simulation and analysis are carried out, and relevant conclusions of charging load distribution are obtained.

Key words: electric vehicles; charging load in residential area; SOC distribution; charging model; modeling

附录

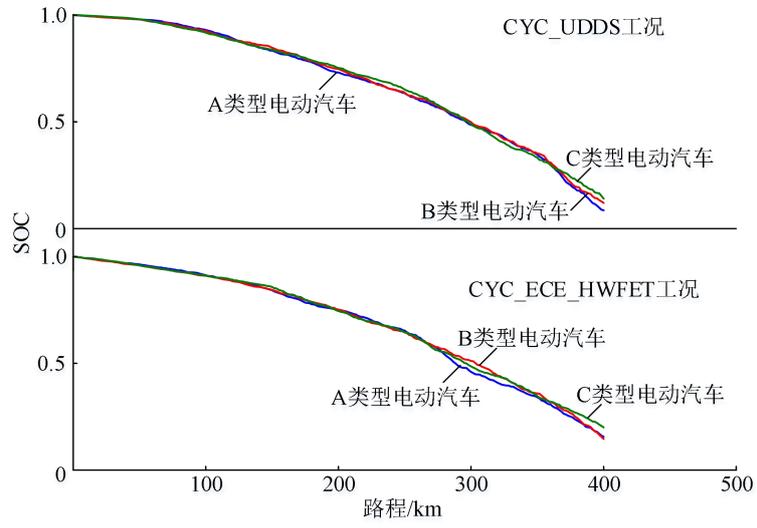


图 A1 另 2 种工况下 SOC-路程的仿真曲线

Fig.A1 Simulation curves of SOC-distance under other two working conditions

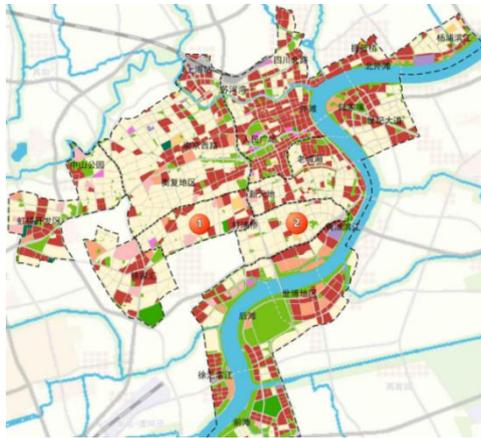


图 A2 上海市中央活动区居民区划分示意图

Fig.A2 Schematic diagram of residential area division in central activity area of Shanghai