

DOI: 10.7667/PSPC180763

基于时空活动模型的电动汽车充电功率计算和 需求响应潜力评估

钱甜甜¹, 李亚平¹, 郭晓蕊¹, 陈星莺², 刘建涛¹, 毛文博¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司南京分院, 江苏 南京 210003; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 电动汽车用户行为的差异导致了电动汽车的时空分布特征不同。为了能够精准计算出电动汽车集群在某时刻、某地点的充电功率及其可提供的需求响应潜力, 提出了一种基于时空活动模型的电动汽车充电功率计算和需求响应潜力评估方法。首先考虑了电动汽车的时空分布特性, 分析了电动汽车的出行活动模型。然后基于实际数据得出了电动汽车充电的关键影响因素分布模型。最后采用蒙特卡洛和二项分布法计算出了单台电动汽车和电动汽车集群在工作日和非工作日的充电功率曲线, 并分析了其需求响应潜力。所提方法能够在兼顾电动汽车时空分布的基础上, 简便快捷地计算出电动汽车的充电功率。

关键词: 电动汽车; 充电负荷; 活动事件; 需求响应

Calculation of electric vehicle charging power and evaluation of demand response potential based on spatial and temporal activity model

QIAN Tiantian¹, LI Yaping¹, GUO Xiaorui¹, CHEN Xingying², LIU Jiantao¹, MAO Wenbo¹

(1. China Electric Power Research Institute Nanjing Branch, Nanjing 210003, China;

2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The difference in user behavior of electric vehicles leads to different spatial and temporal distribution characteristics of electric vehicles. In order to accurately calculate the charging power and the demand response potential of electric vehicle cluster at a certain time and place, this paper proposes a method for calculating the charging power and demand response potential of electric vehicles based on space-time activity model. Firstly, the spatial and temporal distribution characteristics of electric vehicles are considered, and the travel activity model of electric vehicles is analyzed. Then based on the actual data, the distribution model of key influencing factors of electric vehicle charging is obtained. Finally, Monte Carlo and binomial distribution method are used to calculate the charging power curve of single electric vehicle and electric vehicle cluster on working days and non-working days, and the demand response potential are analyzed. The proposed algorithm can calculate the charging power of electric vehicles simply and quickly on the basis of taking into account the space-time distribution of electric vehicles.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901100).

Key words: electric vehicle; charging load; activity event; demand response

0 引言

电动汽车是新能源汽车的主要发展方向, 近年成为国内外汽车产业发展的热点, 国家政策导向明显, 发展速度日益加快, 将逐步迈入产业化阶段。根据国家发展策略及目前示范工程, 电动汽车类型

主要分为私家车、出租车、公交车。出租车和公交车一般具有较为固定的运营时间和耗电量, 充电时间也较为固定, 可控性较差, 一般等效为固定负荷, 而私家车充电特性因为在时空上具有较大的随机性而被重点研究^[1-8]。

私家电动汽车规模化应用将产生大量的充电需求, 电动汽车充电负荷对电网产生影响的直接相关因素是充电起始时间、充电时长、充电功率、充电

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0901100)

次数以及充电地点。对于电动汽车集群而言，每台电动汽车接入电网的起始时间、时长、次数以及接入地点都是随机的，其会带来时空不确定性^[9-10]。分析电动汽车充电需求的时空分布，对电力系统调度控制、充电设施规划以及未来电动汽车参与需求响应和电力市场运营等具有重要的参考价值，也是当前研究的热点，因此，建立一种能较精确考虑电动汽车时空特性且简便有效的电动汽车充电负荷计算方法，是十分重要的。

对于私家电动汽车的充电需求，较为通用的方法是蒙特卡洛法^[11-17]，目前研究存在的问题，要么研究情景过于简单，仅研究了在家充电的情况^[11-12]，给定起始动力电池荷电状态、起始充电时间和日行驶里程的条件下建立简单的模型；要么虽然考虑了电动汽车的时空特性，但是算法较为复杂，而且假定条件太多，与实际情况有一定出入^[13-17]。文献^[11-12]的研究工作较早，对影响电动汽车充电需求的基本因素进行了建模，然后采用蒙特卡洛法求解了1天内电动汽车充电功率需求的期望和标准差，但其充电情景仅为在家充电，与实际情景有一定出入。文献^[13]对于电动汽车集群充电需求的求解，是建立在假定其充电起始时间、充电时长分布等关键因素的基础上，且其时间间隔精确到分钟，在计算大数量电动汽车充电需求时，算法耗时较长。文献^[14]通过停车生成率模型进行停车需求预测，基于电动汽车驾驶、停放特性，提出了考虑时空分布的电动汽车充电负荷蒙特卡洛模拟预测方法。但是当电动汽车数量较大时，对于荷电状态(State of Charge, SOC)的计算会较为繁琐。文献^[15-17]提出一种基于出行链的电动汽车负荷预测方法，该方法能较好地解决电动汽车充电负荷在空间上的随机性问题，但是其仅考虑最长含3个行驶目的地的出行链结构，即最多仅有3个行驶活动，根据全国家庭出行调查(National Household Travel Survey, NHTS)的数据统计，在工作日，仅有3个行驶活动的情况仅占60%，与实际情况有一定差异。

综上，本文提出一种基于主要活动事件的电动汽车充电负荷计算方法，首先基于实际数据，得出电动汽车在主要充电场所的充电起始时间、充电时长分布模型，然后采用蒙特卡洛法和二项分布法得出单台等效电动汽车的充电模型，可以用其快速计算出较大规模的电动汽车充电负荷，所提算法既能统筹兼顾电动汽车的时空分布特性，又较简便快捷，最后在此基础上，估算了电动汽车的可用需求响应潜力。

1 电动汽车的活动模型和充电场景分析

电动汽车的充电行为与其活动事件密切相关，活动事件有两大类：行驶和停驻。居民的日常出行活动一般包含了若干次活动事件。图1(a)是工作日电动汽车出行活动最简单的时空分布状态，图1(b)为增加了三个停驻地的时空分布状态，图1(c)为非工作日电动汽车一种典型的时空分布状态，可以看出，在工作日，电动汽车一般只会在工作单位、家这些主要目的地进行长时间停留，而在餐馆、学校、娱乐场所等地进行短暂停留，所以会选择在家或工作单位进行充电；在非工作日，私家车的出行较为

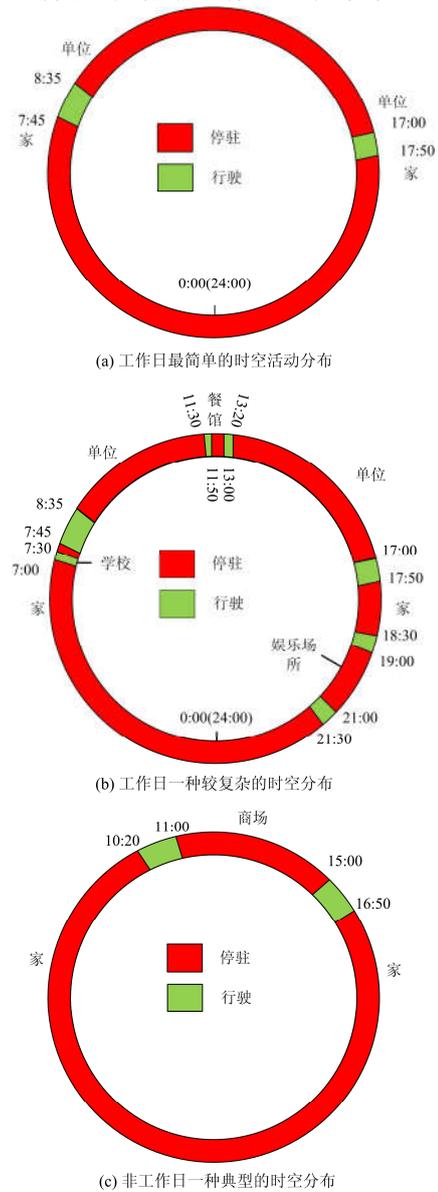


图1 电动汽车出行活动的时空分布

Fig. 1 Space-time distribution of electric vehicle travel activities

随意, 其出行活动可调节性较大, 停放场所一般为餐饮、购物、娱乐场所等公共场所, 这些场所一般为快充(充电功率大于等于 20 kW), 充电成本较高, 私家车会比较多的考虑到充电成本, 一般会选择在家进行常规充电或慢速充电, 其充电时间一般是 3~8 h, 调查显示, 这种充电方式下, 一天中约有 80% 以上的时间都处于与电网相连接的状态, 也给电动汽车参与电网的需求响应奠定了良好的基础。

综上, 本文选择的充电地点为家和工作单位。按照多数用户的充电习惯, 家是主要的充电场所, 且本文情景假定为每天不论是否在外充电, 最后一次到家后一定会在家充电。在工作日, 电动汽车在工作单位充电的条件为: 车辆到达工作单位时的 SOC 小于等于最低阈值; 车辆到达工作单位时的 SOC 虽大于阈值, 但不足以支撑接下来的行驶里程。在非工作日, 充电场所仅为家。

判断电动汽车 i 是否在工作地充电的算法如下, 假定电动汽车的初始出行 SOC 为 $S_{i,0}$, 到达主要目的地工作单位的 SOC 为 $S_{i,work}$, 其计算表达式为式(1), 如果 $S_{i,work}$ 小于等于阈值, 则在工作单位处必须充电。

$$S_{i,work} = S_{i,0} - \sum_{k=1}^{work} l_{i,k} \omega_{i,k} / Q_i \quad (1)$$

如果 $S_{i,work}$ 大于等于阈值, 但是到达下一充电地-家处的 SOC 小于等于阈值, 也必须在工作单位处充电。

$$S_{i,home} = S_{i,0} - \sum_{k=1}^{home} l_{i,k} \omega_{i,k} / Q_i \quad (2)$$

式中: $l_{i,k}$ 是电动汽车 i 的第 k 段行驶里程; $\omega_{i,k}$ 是电动汽车 i 在第 k 段行程的每公里耗电量; Q_i 是电动汽车 i 的电池容量。 $\omega_{i,k}$ 与车辆的行驶状态相关, 其主要包括车速和空调使用情况。一般来说, 当道路畅通时, 行驶速度快; 当道路拥堵时, 行驶速度慢。通常当电动汽车中速行驶时, 安全并且省电; 速度过快, 电动机始终以最大功率输出, 发热较大因此需额外消耗一些电能; 速度过慢以及频繁刹车启动, 同样会导致耗电量增加。空调系统的使用会使每公里耗电量显著增加。当空调开启时, 电池组不仅需向动力系统供电, 同时还需向空调系统供电以维持车厢内温度。据文献调研统计, 在其他外部条件类似的情况下, 空调开启时段的耗电量约为非空调时段的两倍^[18]。每公里耗电量的精确获得是极其困难的, 本文会在下文中给出一种工程化的处理方法。

2 基于主要出行目的地的计算模型

2.1 充电起始时间的分布

依据 NHTS 的数据, 统计出在工作日, 仅在家充电的电动汽车充电起始时间分布, 拟合得到其分布函数如表 1 所示。

表 1 工作日, 仅在家充电的电动汽车充电起始时间分布

模型	系数	拟合优度
$f(x) = a_1 \exp(-((x - b_1) / c_1)^2)$	$a_1 = 0.1976$	SSE: 0.003 195
	$b_1 = 17.9$	R-square: 0.966 1
	$c_1 = 2.71$	Adjusted R-square: 0.962 8
		RMSE: 0.012 33

统计需在工作单位充电的, 在工作单位处充电的起始时间分布和在家充电的起始时间分布, 分别拟合得到其分布函数如表 2 所示。

表 2 工作日, 在 work 和 home 充电的电动汽车充电起始时间分布

模型	系数	拟合优度
$f(x) = a_1 \exp(-((x - b_1) / c_1)^2)$	$a_1 = 0.2429$	SSE: 0.002 25
	$b_1 = 7.568$	R-square: 0.981 3
	$c_1 = 2.163$	Adjusted R-square: 0.979 6
		RMSE: 0.010 35
$f(x) = a_1 \exp(-((x - b_1) / c_1)^2)$	$a_1 = 0.2007$	SSE: 0.002 635
	$b_1 = 18.51$	R-square: 0.973 2
	$c_1 = 2.72$	Adjusted R-square: 0.970 6
		RMSE: 0.011 2

在非工作日, 最后一次到家的时间即为起始充电时间, 依据样本数据, 拟合得到其分布函数如表 3 所示。

表 3 非工作日, 在家充电的电动汽车起始充电时间分布

模型	系数	拟合优度
$f(x) = a_1 \exp(-((x - b_1) / c_1)^2)$	$a_1 = 0.108$	SSE: 0.001 267
	$b_1 = 16.11$	R-square: 0.966 5
	$c_1 = 5.36$	Adjusted R-square: 0.963 3
		RMSE: 0.007 766

2.2 充电时长的分布

电动汽车的充电时长分布不能直接统计拟合出

来, 需间接计算才能得到。能直接拟合得到的量是电动汽车的行驶里程分布, 可以通过行驶里程分布、每公里耗电量以及充电功率求解出电动汽车的充电时长。在这些充电场所的停放时间可以让电动汽车有充裕的时间充满电, P_{work} 为电动汽车在工作单位处的额定充电功率, P_{home} 为电动汽车在家处的额定充电功率, 充电时长的计算公式如下所述。

工作日, 在工作单位的充电时长如式(3)所示。

$$t_{i,w} = \sum_{k=1}^{work} l_{i,k} \omega_{i,k} / P_{work} \quad (3)$$

在家的充电时长: 仅在家充电, 如式(4)所示, 既在家充电又在工作单位充电, 如式(5)所示。

$$t_{i,h_o} = \sum_{k=1}^{home} l_{i,k} \omega_{i,k} / P_{home} \quad (4)$$

$$t_{i,h_b} = \sum_{k=work}^{home} l_{i,k} \omega_{i,k} / P_{home} \quad (5)$$

非工作日, 与工作日类似, 充电时长的计算公式为

$$t_{i,h} = \sum_{k=1}^{home} l_{i,k} \omega_{i,k} / P_{home} \quad (6)$$

为方便理解, 计算工作日电动汽车充电起始时间和充电时长分布的流程图如图 2 所示。非工作日的充电起始时间和充电时长计算过程与工作日相似。但非工作日出行时段分布较为均匀, 对于 $\omega_{i,k}$ 的计算仅考虑温度因素, $\omega_{i,k}$ 的计算标准参见文献[19-20]。

结合 NHTS 的数据, 得到的充电时长分布结果(工作日, 仅在家充电)如表 4 所示。

表 4 工作日, 仅在家充电的电动汽车充电时长分布

Table 4 On working days, the distribution of electric vehicles charging duration only charged at home

模型	系数	拟合优度
$f(x) = a_1 \exp(-((x - b_1) / c_1)^2)$	$a_1 = 0.3385$	SSE: 0.000 715 5
	$b_1 = 1.122$	R-square: 0.99
	$c_1 = 2.209$	Adjusted R-square: 0.98
		RMSE: 0.018 91

结合 NHTS 的数据, 得到在工作日既在工作单位充电又在家充电, 在工作单位和家处的充电时长如表 5 所示。

表 5 工作日, 在 work 和 home 充电的电动汽车充电时长分布

Table 5 On working days, the charging duration of electric vehicle charged on work and home

模型	系数	拟合优度
$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2})$	$\mu = 0.084\ 986\ 2$	Log likelihood: -744.394
	$\sigma = 0.628\ 122$	
$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2})$	$\mu = 1.096\ 28$	Log likelihood: -117.6
	$\sigma = 0.414\ 002$	

结合 NHTS 的数据, 得到在非工作日在家充电的充电时长分布结果如表 6 所示。

表 6 非工作日, 在家充电的电动汽车充电时长分布

Table 6 On non-working days, charging duration of electric vehicle charged at home

模型	系数	拟合优度
$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2})$	$\mu = 0.045\ 725\ 9$	Log likelihood: -173.7
	$\sigma = 0.965\ 068$	

3 电动汽车充电功率曲线计算模型

电动汽车在某时刻 t 充电与否是一个二项分布, 设其正在充电时, 随机变量 $\xi_t = 1$, 未充电时, 随机变量 $\xi_t = 0$, 其发生概率分别为

$$P(\xi_t = 1) = 1 - F(t_s > t, t_s + t_c \leq t + 24) - F(t_s + t_c < t_c) \quad (7)$$

$$P(\xi_t = 0) = F(t_s > t, t_s + t_c \leq t + 24) + F(t_s + t_c < t_c) \quad (8)$$

式中: F 为充电开始时刻和充电时长的联合概率分布函数; t_s 为电动汽车的起始充电时间; t_c 为电动汽车的充电时长。电动汽车在 1 天中某时刻 t 的充电功率需求为 P_t , P_t 的概率分布满足式(8), 其中 P_c 为电动汽车的额定充电功率。

$$P_t = P(\xi_t) P_c \quad (9)$$

采用蒙特卡洛随机采样法求解上述式子, 使用第 2 节得到的分布函数, 生成 n 辆电动汽车在工作日的数据, 按照前面的样本统计数据比例, 在工作单位处充电的汽车数量为 n_1 , 仅在家充电的数量为 n_2 。充电功率的计算流程图如图 3 所示。

4 算例分析

本文采用 NHTS 提供的统计数据对电动汽车充电需求进行分析, 电动汽车的型号为 Nissan Leaf, 每公里耗电量为 0.15~0.3 kWh, 电池容量 24 kWh, 续航里程在正常气候条件、工况下为 160 km。得出单台电动汽车工作日和非工作日在不同充电地点的充电功率需求如图 4 所示。由中心极限定理可知, n 台电动汽车的充电分布服从正态分布 $N(n\mu, n\sigma^2)$, 得到 100 000 辆电动汽车在工作日和非工作日的充电功率需求如图 5 所示, 红色和蓝色曲线分别代表堵塞较严重, 35°; 道路工况正常, -10° 的情景。可以看出, ω 对电动汽车集群的充电需求影响较大, 特别是上班高峰期, 道路拥堵和使用空调的情况下, 电动汽车集群的充电需求远大于基础工况; 在工作

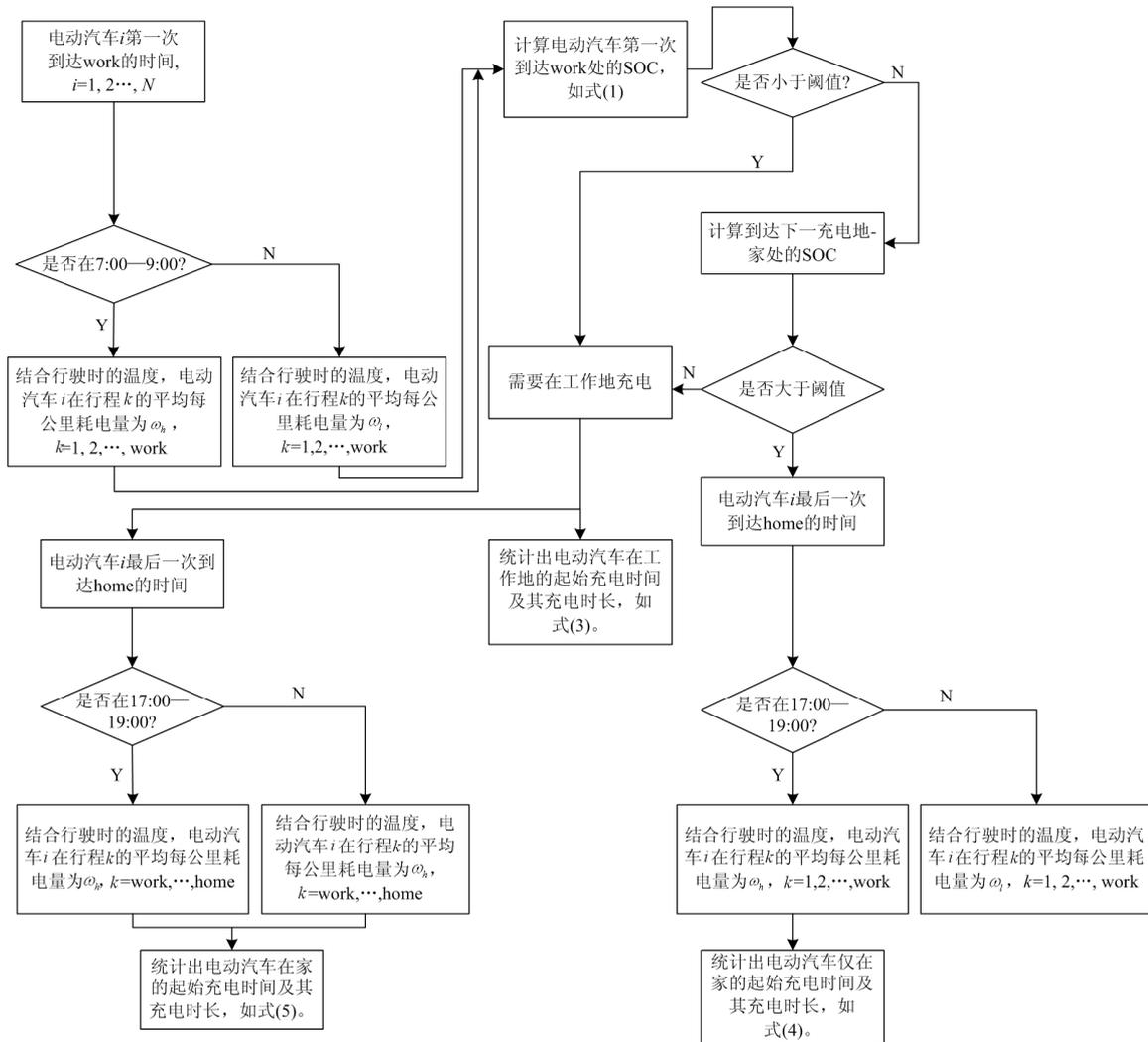


图 2 计算电动汽车起始充电时间和充电时长分布的流程图

Fig. 2 Flow chart of calculating the starting charging time and charging duration distribution of electric vehicles

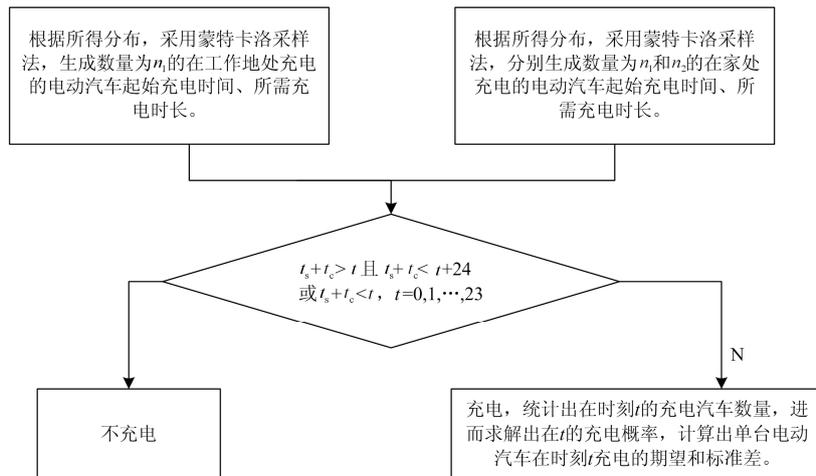
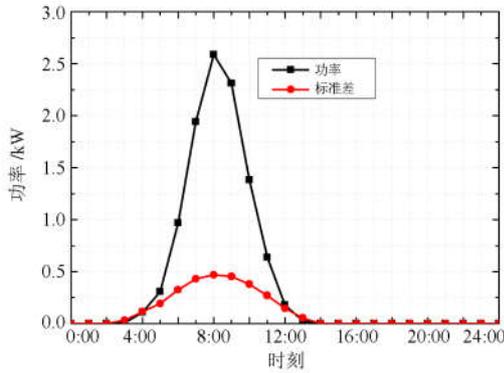
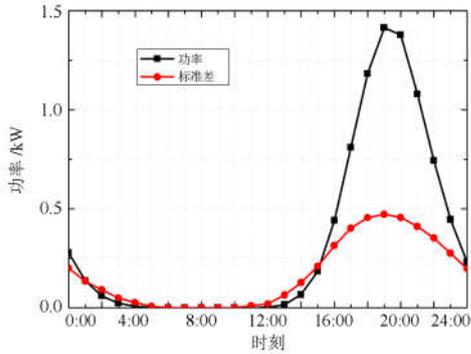


图 3 单台电动汽车的充电概率计算流程图

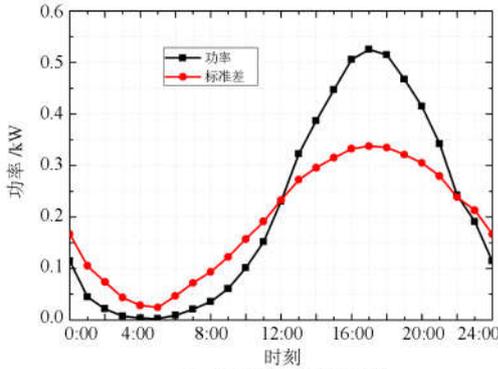
Fig. 3 Flow chart of charging probability calculation for a single electric vehicle



(a) 工作日在工作单位处充电



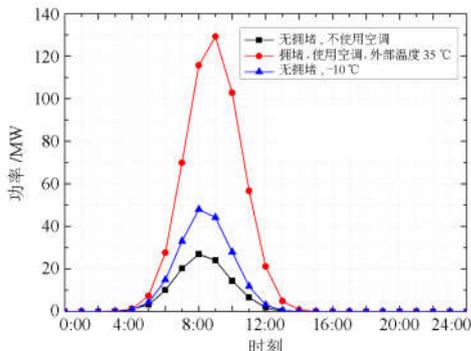
(b) 工作日在家处充电



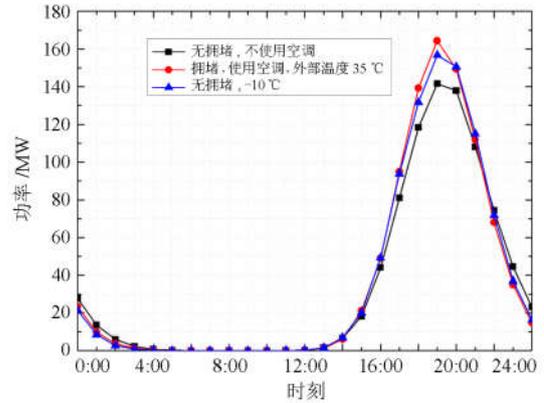
(c) 非工作日在家处充电

图 4 单台电动汽车的充电功率曲线

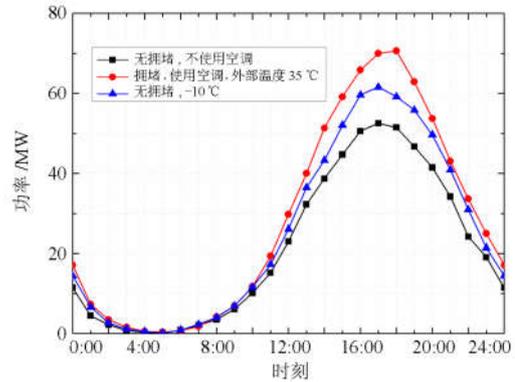
Fig. 4 Charging probability power curve of single electric vehicle



(a) 工作日在工作单位处充电



(b) 工作日在家处充电



(c) 非工作日在家处充电

图 5 100 000 辆电动汽车在不同工况温度下的充电功率曲线

Fig. 5 Charging power curve of 100 000 electric vehicles under different operating conditions

日,100 000 辆电动汽车在工作单位处的充电高峰值最大可达 130 MW,在家处的充电高峰值最大可达 160 MW;在非工作日,在家处的充电高峰值最大可达 70 MW。

如果将用户在工作单位的充电起始时间推迟 2 h,可得到潜在的可调度需求响应潜力如图 6(a)所示,可以看出,在工作日工作单位处原本 9:00 左右产生的充电负荷高峰可被削减 60 MW;如果将用户在家里的充电起始时间推迟 6 h,可得到潜在的可调度需求响应潜力如图 6(b)所示,在家处原本 19:00 左右产生的充电负荷高峰,可被削减 160 MW;在非工作日,如图 6(c)所示,在家处 18:00 左右产生的充电负荷高峰,可被削减 40 MW。在工作日,电动汽车的充电时间比较集中,所以时移产生的负荷削减量比较大,可提供的需求响应潜力较大,在非工作日电动汽车的充电时间比较分散,所以时移产生的负荷削减量较小,可提供的需求响应潜力也就较小。

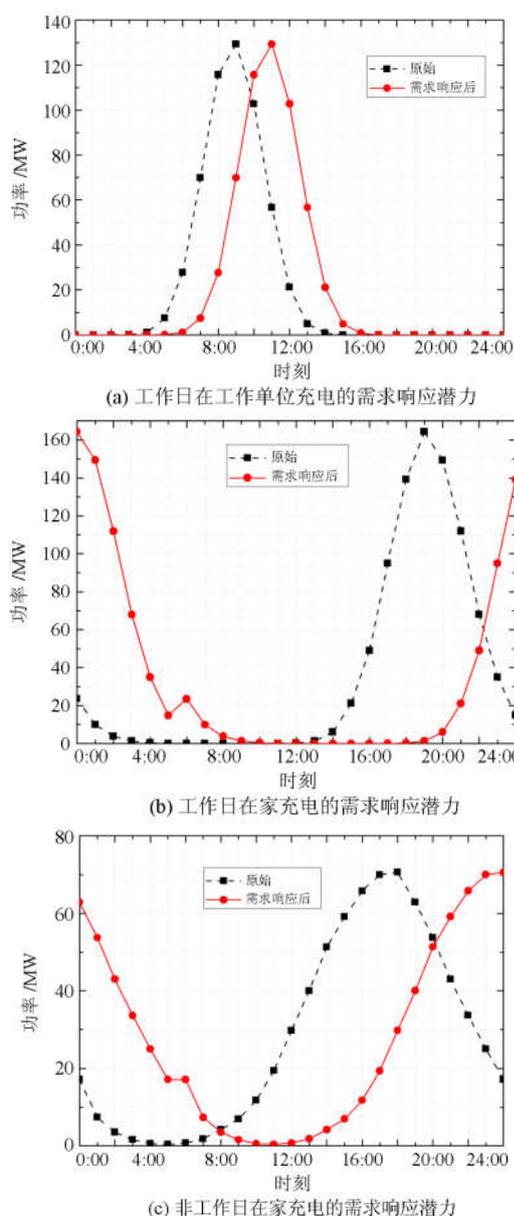


图 6 100 000 台电动汽车的需求响应潜力评估

Fig. 6 Evaluation of demand response potential of 100 000 electric vehicles

5 结论

本文研究了工作日和非工作日电动汽车在主要停驻地家和用人单位的充电需求, 由于还未能获得国内数据, 基于 NHTS 的实际数据建立了关键因素的分布模型, 采用蒙特卡洛法和二项分布法结合的方法, 计算出了单台电动汽车的充电模型, 进而能较为方便地估算出多台电动汽车的充电需求和可用需求响应潜力需求, 算法简单又兼顾了电动汽车的时空特性, 具有一定的工程应用前景。待获取国内私家电动汽车的出行活动数据后, 可以采用本文

所提方法, 较为精准、简便快捷地计算出该区域主要充电场所的充电负荷。

参考文献

- [1] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [2] 胡道栋, 张娟, 克满, 等. 电动汽车充换电站换电操作管理单元的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 136-142.
HU Daodong, ZHANG Juan, KE Xiao, et al. Design and implementation of the battery-swapping operation control unit at the EV charging/swap station[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 136-142.
- [3] LOPES J A P, SOARES F J, ALMEIDA P M R. Integration of electric vehicles in the electric power system[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 168-183.
- [4] 胡宇航, 皮一晨, 崔静安, 等. 电动汽车充电站负荷建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 107-112.
HU Yuhang, PI Yichen, CUI Jingan, et al. Research on electric vehicle charging station modeling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 107-112.
- [5] 王鑫, 周步祥, 唐浩. 考虑用户因素的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 129-137.
WANG Xin, ZHOU Buxiang, TANG Hao. A coordinated charging/discharging strategy for electric vehicles considering customers' factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 129-137.
- [6] 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(3): 93-107. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.
- [7] KANG J, YU R, HUANG X, et al. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3154-3164.
- [8] MARTINEZ C M, HU X, CAO D, et al. Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: recent progress and a connected vehicles perspective[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 4534-4549.

- [9] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [10] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 32(2): 127-131.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [11] 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.
- [12] WU D, ALIPRANTIS D C, GKRTZA K. Electric energy and power consumption by light-duty plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 738-746.
- [13] 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.
- [14] 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. Electric vehicle charging load forecasting method considering temporal and spatial distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [15] 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. Electric vehicle charging load forecasting model based on trip chain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 216-225.
- [16] 温剑锋, 陶顺, 肖湘宁, 等. 基于出行链随机模拟的电动汽车充电需求分析[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1477-1484.
WEN Jianfeng, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. Analysis on charging demand of EV based on stochastic simulation of trip chain[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1477-1484.
- [17] 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.
- [18] 张家玮. 基于数据驱动的电动汽车行驶里程模型建立与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
ZHANG Jiawei. Modeling and analyzing of driving mileage of electric based on data-driven[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [19] Nissan. Electric car model[EB/OL]. [2018-05-07]. <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/leaf.html>.
- [20] Urban dynamometer driving schedule (UDDS)[EB/OL]. [2018-05-07]. <https://www.epa.gov/>.

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-09-01

作者简介:

钱甜甜(1990—), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为电网与用户供需互动, 用户侧的负荷辨识; E-mail: qiantiantian@epri.sgcc.com.cn

李亚平(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电网智能调度与控制、高效用电与节能、能源管理与能源经济。E-mail: liyaping@epri.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)