

引用格式: 游磊, 金小明, 刘云. 电动汽车集群充电负荷计算方法研究 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 159-167. YOU Lei, JIN Xiaoming, LIU Yun. Research on the charging load calculation method for electric vehicle cluster [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 159-167. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.17.

# 电动汽车集群充电负荷计算方法研究

游磊<sup>✉</sup>, 金小明, 刘云

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的] 电动汽车的普及使得人们的出行变得更加环保, 但大规模电动汽车充电也增大了电网供电的压力。为了评估电动汽车充电对电网的冲击, 构建了一种基于蒙特卡洛法的大集群电动汽车的充电负荷计算方法。[方法] 在该方法中, 电动汽车根据用途被分为 6 类: 私家车、公交车、出租车、网约车、公务车和物流车。对每一类电动汽车, 提取其典型电池性能参数, 并建立概率模型描述其出行和充电行为的随机性。再结合各类电动汽车规模的预测, 通过随机取样模拟每个电动汽车的日内充电安排, 进而确定其日内充电负荷, 最后通过聚合方法得到电动汽车集群的总充电负荷。[结果] 以 2030 年南方某省电动汽车集群作为仿真案例。[结论] 案例分析表明所提出的方法能够提供各类型电动汽车和整个集群的日内充电负荷。同时, 在所有电动汽车类型中, 公交车的充电负荷峰值最高, 达到 4 639.5 MW, 其次是私家车的负荷峰值, 但不到公交车的 70%, 而出租车的负荷峰值最低。整个电动汽车集群充电高峰在夜晚 19:00—23:00, 负荷峰值可达 10.092 7 GW。

**关键词:** 电动汽车集群; 充电负荷; 概率模型; 蒙特卡洛法; 随机取样

中图分类号: TM7; TM910.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)05-0159-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.17

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Research on the Charging Load Calculation Method for Electric Vehicle Cluster

YOU Lei<sup>✉</sup>, JIN Xiaoming, LIU Yun

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] The widespread adoption of electric vehicles (EVs) enhances environmental sustainability during travel, yet it simultaneously elevates strain on the mains supply. To assess the impact of EV charging on the power grid, a specialized charging load calculation method is developed for large EV cluster on the basis of the Monte Carlo method. [Method] In this approach, EVs were categorized into six groups based on their usage: private EVs, electric buses, electric taxis, online ride-hailing EVs, official EVs, and logistics EVs. Typical battery performance parameters for each group were identified, and probability models were established to characterize the variability in their travel and charging patterns. By integrating group scale forecasts, daily charging schedules for each group were simulated through random sampling. Subsequently, the daily charging load for each group was calculated, culminating in the total charging load for the EV cluster through an aggregation method. [Result] The EV cluster in a southern province in 2030 was taken as the simulation case. [Conclusion] The case analysis reveals that the proposed approach can provide the daily charging load of various EV groups and the entire EV cluster. Furthermore, among all types of EVs, electric buses have the highest peak charging load at 4 639.5 MW, followed by that of private EVs (not higher than 70% of the electric buses' peak load), and electric taxis have the lowest peak charging load. The charging peak of the entire EV cluster occurs between 19:00 and 23:00 at night, and the peak load can reach 10.092 7 GW.

**Key words:** EV cluster; charging load; probability model; Monte Carlo method; random sampling

收稿日期: 2023-04-26 修回日期: 2023-08-17

基金项目: 国家重点研发计划“高性能高温超导材料及磁储能应用”(2021YFB3800200); 中国能建广东院科技项目“考虑大规模新能源接入和电动汽车灵活性的源储侧规划方法研究”(EV11031W)

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

在实施双碳目标的背景下,电动汽车(Electric Vehicle, EV)由于其节能环保的优势,将在未来得到大规模普及<sup>[1-2]</sup>。2020年11月,国务院办公厅发布了《新能源汽车产业发展规划(2021—2035)》,提出到2025年,我国新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的20%左右。根据公安部的统计数据,截至2022年底,全国新能源汽车保有量达1310万辆,其中纯电动汽车保有量1045万辆<sup>[3]</sup>。中国汽车工业协会发布的数据显示,2022年新能源汽车销量达688.7万辆,市场占有率达25.6%,其中电动汽车销量536.5万辆<sup>[4]</sup>,显示出强大的市场活力。

与此同时,电动汽车作为一种新型负荷,其充电负荷的随机性和波动性较强,而电网内整个电动汽车集群可能包括海量的电动汽车,其整体的充电负荷可能与原先的电网基础用电负荷叠加,造成“峰上加峰”的现象,加大电网峰谷差,增大电网安全供电的压力,威胁电网的运行安全<sup>[5-7]</sup>。因此,为了有效应对大规模电动汽车充电对电网的冲击,需要较为准确地评估和计算电动汽车集群充电负荷。

关于电动汽车集群充电负荷的计算,一些文献考虑蒙特卡洛模拟法,即通过拟合用户出行和充电习惯相关的概率分布,模拟每个电动汽车的日内充电行为,由此计算大规模电动汽车的整体充电负荷<sup>[8-11]</sup>。但已有文献在进行概率拟合时往往较为主观,缺乏较为可靠的统计依据。并且已有文献所考虑的电动汽车类型往往较少,一般只包括私家车、出租车和公交车。随着更多类型汽车的电动化,电动汽车充电负荷的计算也应考虑更多的汽车类型,如网约车和物流车。也有一些文献基于交通运输模型来模拟每个电动汽车的出行和充电行为,并由此计算电动汽车的充电负荷<sup>[12-14]</sup>。但该方法需要建立准确的交通运输模型,较为复杂,这限制了该方法的应用。

文章基于蒙特卡洛模拟法,建立了一种适用于大集群电动汽车的充电负荷计算方法,通过概率分布描述电动汽车出行和充电行为的随机性,再利用随机取样模拟各个电动汽车的充电安排,并计算电

动汽车集群的总充电负荷,最后将该计算方法应用到2030年南方某省的电动汽车集群。相比已有的计算方法,文章中的方法能够考虑更多的电动汽车类型,包括网约车和物流车,并且可以考虑更多的充电行为细节,包括快慢充和是否白天补电等。

## 1 电动汽车出行和充电特性分析

不同类型的电动汽车,其出行和充电规律往往不同<sup>[15-16]</sup>。比如,电动私家车往往在上班后工作地点充电或者下班后在家中充电,且大多采用慢充;出租车为了最大化有效运营时间,往往有空就充且采用快充充电。因此,电动汽车集群充电负荷的计算需要对电动汽车进行分类,并考虑各类电动汽车的出行和充电行为特征。

本文中,电动汽车集群充电负荷计算方法的基本结构如图1所示。该方法把电动汽车分为私家车、公交车、公务车、出租车、网约车和物流车共6种。对各类型电动汽车,提取其出行和充电行为规律,再通过概率分布描述其出行和充电行为的随机性,然后,基于电动汽车数量预测,采用蒙特卡洛法计算每一辆电动汽车的日内充电负荷,并将其聚合为整个

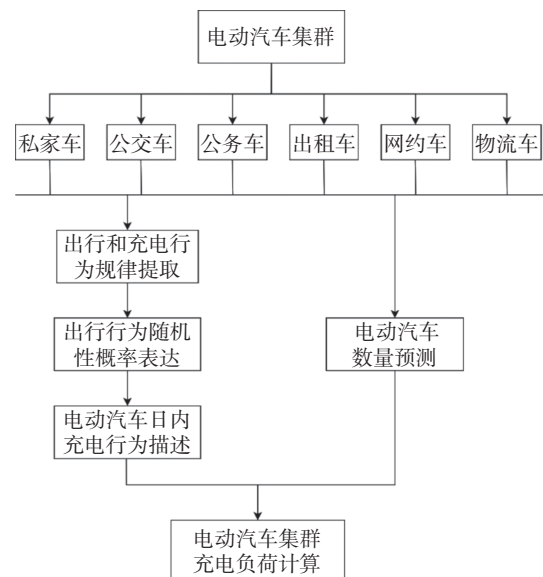


图 1 电动汽车集群充电负荷计算方法的基本结构

Fig. 1 General structure of the charging load calculation method for EV cluster

集群的充电负荷。

接下来,本文对各类型电动汽车的出行和充电行为特征进行分析,并由此确定用于描述出行和充电行为随机性的概率分布。

### 1.1 公交车

公交车白天按照固定的排班计划运营,一般白天无法长时间充电,因而本文考虑公交车夜晚结束运营后在专门停车场充电。对于行驶里程较长的公交车,可能需要白天短时快速补电以满足全天里程需求。文献[17]的调查发现公交车一般全天充电1~2次,这里假定白天最多补电一次。

公交车的首末班时间分别大体对应着晚上充电的最晚结束时间和最早开始时间。通过查阅南方某市的公交车排班时间表,发现公交车的首末班时间分别集中于5:00—9:00和16:00—24:00之间。通过分布拟合,这里采用正态分布 $N(7, 0.67)$ 和 $N(20.5, 1.5)$ 来拟合首末班时间的统计分布。注意这里使用的正态分布表达式为 $N(\mu, \sigma)$ ,其中 $\mu$ 为均值, $\sigma$ 为标准差。

根据中国新能源汽车大数据研究报告的统计,2021年公交车日均行驶里程位于50~300 km,均值约151 km<sup>[18]</sup>,拟合得到统计分布 $N(151, 55)$ 。本文假定公交车采用快充来充电。

### 1.2 私家车

私家车一般选择在家或者工作地点充电。根据文献[17]的统计,私家车在工作地点和家中接入电网的时间分别集中于6:00—11:00和14:00—1:00(次日),这里分别采用 $N(8.32, 0.85)$ 和 $N(19.55, 2.06)$ 作为其统计分布。与文献[19]一致,这里假定在家和工作地点充电的私家车占比分别为80%和20%。

报告[18]中的统计结果显示私家车一般日均行驶里程不超过120 km,统计分布符合 $N(46.3, 15.3)$ 。考虑到私家车全天里程不长,一般单次充满电即可满足全天行驶需求,故这里不考虑私家车在其它时间的补电。根据报告[18],私家车快充和慢充占比分别为15%和85%。

### 1.3 公务车

公务车往往白天用于公务出行,夜晚于工作地点充电,一般没有长途出行的需求。公务车开始充电时间集中于16:00—20:00,统计分布满足 $N(17.68, 0.76)$ <sup>[17]</sup>。这里假定公务车采用慢充,其它参数的设

定与私家车的保持一致。

### 1.4 出租车

本文假定出租车运营采用轮班制,即由两位司机每12 h轮流驾驶。文献[17]对电动出租车的开始充电时间进行了统计,其中将一天分成了4块:0:00—8:00、8:00—15:00、15:00—19:00和19:00—24:00,分别对应统计分布 $N(3.93, 1.86)$ 、 $N(11.94, 1.36)$ 、 $N(16.98, 0.9)$ 和 $N(21.56, 0.98)$ 。

基于报告[18]中的统计数据,出租车单车日均行驶在50~450 km间,统计分布符合 $N(186, 85)$ 。部分出租车一天行驶里程较长,可能需要一天多充以满足耗电需求。上海市曾对100辆纯电动出租车的充电特征进行过统计,结果发现电动出租车日均充电次数2.3次,且约84%的电动出租车每天充2~3次电。因此,本文考虑出租车一天两充。此外,出租车在每次充满电后,一般应等到电池电量降低到一定水平后再考虑充电,因此这里假定出租车有2种充电模式:(1)在0:00—8:00和15:00—19:00充电;(2)在8:00—15:00和19:00—24:00充电。2种模式的占比都设定为50%。

参照文献[17],这里假定电动出租车采用快充,从而最大化有效营运时间。

### 1.5 网约车

报告[18]的统计数据显示,网约车的开始运营时间位于4:00—9:00间,结束运营时间位于18:00—1:00(次日)间,这里分别用 $N(6.5, 0.83)$ 和 $N(21.5, 1.17)$ 描述开始和结束运营时间的统计分布。

基于报告[18]的统计数据,网约车单车日均行驶里程在50~400 km间,符合 $N(184, 62.5)$ 的统计分布。根据报告[18],网约车快充和慢充占比分别约为75%和25%。

### 1.6 物流车

基于报告[18]的统计结果,电动物流车日均行驶里程范围为25~300 km,拟合结果显示其满足 $N(97, 60)$ 的统计分布。报告[18]还指出电动物流车从上午4:00—10:00出行量不断上升,下午出行高峰发生在15:00—16:00,之后出行量不断下降。本文假定电动物流车于上午4:00—10:00间开始一天的行程(即开始一天运营),统计分布取 $N(7, 1)$ ;于下午16:00—24:00间结束一天行程(即结束一天运营),统计分布取 $N(20, 1.33)$ 。

从充电方式看,2021年物流车选择快充的占比由2019年的29.8%提升到了2021年的58.9%<sup>[18]</sup>。本文假定未来该占比达到70%。

## 2 电动汽车集群充电负荷计算方法

### 2.1 基本思路和假设

本文采用蒙特卡洛模拟法来计算整个电动汽车集群的充电负荷。基本思路是基于上一章中对电动汽车出行时间和里程及充电习惯相关的统计分布进行随机取数,提取各个电动汽车的出行和充电行为,由此模拟其一天内的充电安排并计算日内充电负荷,进而计算整个集群的总充电负荷。

该方法还需要以下假设:

1)公交车、网约车和物流车结束一天营运的时间就是开始充电的时间。

2)对于一天内行驶里程较长的公交车、网约车和物流车,其会于白天额外快速补电。这里假设快速补电发生在开始和结束运营时间的中间时刻,且补电功率取各类电动汽车的快充功率。对其它类型电动汽车,考虑其一天里程较短或一天多次快充,这里假定除了上一章描述的充电之外,其不需要额外补电。

3)对各类型电动汽车,不管慢充或快充,充电效率始终设定为95%。

### 2.2 具体计算过程

电动汽车集群充电负荷的计算步骤如图2所示。

图2中的各步骤将在以下各节中详细解释。

#### 2.2.1 各类型电动汽车数量预测

关于电动汽车数量的预测,当前已有较多方法,包括弹性系数法、千人保有量法和基于Bass模型的预测法等<sup>[20-21]</sup>,这里不再赘述,具体可参考有关文献。此外,对于公交车、出租车和公务车,其数量在短期内可能不会发生太大变化,可结合其规模发展趋势和政府政策进行预测<sup>[17]</sup>。

#### 2.2.2 电动汽车代表性电池参数确定

本文考虑表1中的电动汽车电池参数设定。电动公交车电池参数参考比亚迪B10。其它类型电动车电池参数根据近三年畅销车型而定。需要特别指出的是:

1)电物流流车车型众多,本文根据电池参数将电物流流车分为4类(见表1)。根据有关统计,各大

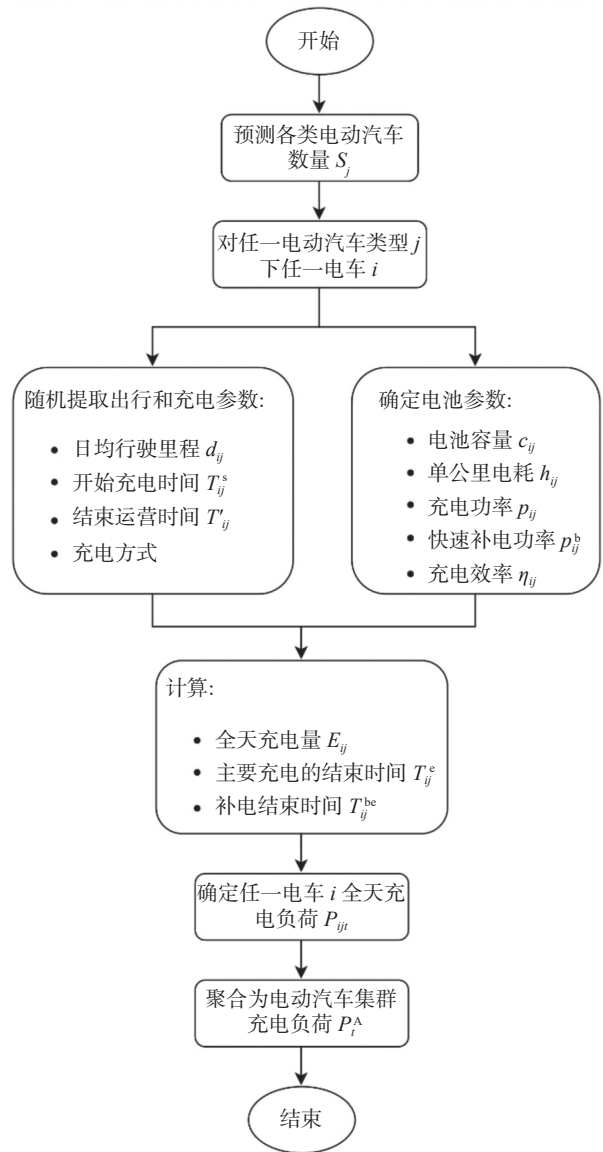


图2 电动汽车集群充电负荷计算步骤

Fig. 2 Calculation steps of the charging load for EV cluster

类物流车近三年的年均销量占比分别约为73%、10%、4%和13%<sup>[22]</sup>,这里假定未来各类物流车保有量也保持着相同的占比分布。

2)根据《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》,2025年纯电动乘用车新车平均电耗需降至0.12 kWh/km。参考文献[9],这里假定电动车额外需要20%的电力用于空调制冷,则乘用车(包括私家车、公务车、出租车和网约车)电耗为0.144 kWh/km。

#### 2.2.3 电动汽车参数提取

假定各类型电动汽车数量的预测结果为 $S_j, j=1, 2, \dots, 6$ 。对于每一类电动汽车 $i$ ,考虑属于该类的有电动汽车 $i=1, 2, \dots, S_j$ ,基于第一章中关于各类电

表 1 电动汽车代表性电池参数

Tab. 1 Representative battery parameters of EVs

电动汽车类型	电池容量/ kWh	单公里电耗/ (kWh·km <sup>-1</sup> )	慢充功率/ kW	快充功率/ kW
公交	355	1.315	30	90
私家	60	0.144	7	60
公务	60	0.144	7	60
出租	60	0.144	7	90
网约	60	0.144	7	90
物流 <sup>1</sup>	40	0.180	7	60
	47	0.245	7	60
	57	0.255	7	60
	96	0.270	7	60

注: 本文将物流车分为4类, 按其代表性电池容量由小到大排列, 其中第一类包含微面、中面和微卡车型, 第二类和第三类分别指大面和小卡车型, 第四类包含轻卡和其它车型。

动车出行和充电行为的概率分布, 随机提取每个电动车的日均行驶里程、充电开始和最晚结束时间以及充电方式(快或慢充), 然后结合表 1 中的代表性电池参数设定确定每个电动车的电池参数。表 2 归纳了用于充电负荷计算的电动汽车参数。

表 2 用于充电负荷计算的电动汽车参数

Tab. 2 EV parameters used for charging load calculation

参数	符号
日均行驶里程	$d_{ij}$
开始充电时间 <sup>1</sup>	$T_{ij}^s$
结束一天运营的时间 <sup>2</sup>	$T'_{ij}$
电池容量	$c_{ij}$
单公里电耗	$h_{ij}$
充电功率	$p_{ij}$
快速补电功率	$p_{ij}^b$
充电效率	$\eta_{ij}$

注: 1) 每辆出租车一天两次快充, 故需要提取两个开始充电时间。

2) 只需要对公交车、网约车和物流车提取该时间。

### 2.2.4 电动汽车日内充电负荷计算

对电动汽车  $i=1, 2, \dots, S_j$ , 一天内所需充电量  $E_{ij}$  可通过式(1)计算:

$$E_{ij} = d_{ij}h_{ij} \quad (1)$$

不同类型电动车充电负荷的计算公式也有区别。

#### 1) 私家车和公务车

对于这 2 类电动车, 充电结束时间  $T_{ij}^e$  计算式为

式(2):

$$T_{ij}^e = T_{ij}^s + \frac{E_{ij}}{p_{ij}\eta_{ij}} \quad (2)$$

一天内电网侧的充电负荷可用式(3)计算:

$$P_{ijt} = \begin{cases} p_{ij}, T_{ij}^s \leq t \leq T_{ij}^e \\ 0, \text{一天内其它时间} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$t$ ——时间。

#### 2) 公交车、网约车和物流车

对于这些电动车, 首先通过式(4)判断是否需要白天快速补电:

$$\min[p_{ij}\eta_{ij}(T'_{ij} - T_{ij}^s), c_{ij}(1 - \delta_{ij})] \leq d_{ij}h_{ij} \quad (4)$$

式中:

$\delta_{ij}$ ——车主能接受的最低电池电量百分比, 本文取 25%;

$p_{ij}\eta_{ij}(T'_{ij} - T_{ij}^s)$ 和  $c_{ij}(1 - \delta_{ij})$ 为考虑充电时长限制和电池容量限制的最大可充电量, 两者中的最小值代表了实际最大可充电量, 而如果其小于当天耗电量, 则需要白天快速补电。

相对应的, 快速补电的补电量  $E_{ij}^b$  为式(5):

$$E_{ij}^b = E_{ij} - \min[p_{ij}\eta_{ij}(T'_{ij} - T_{ij}^s), c_{ij}(1 - \delta_{ij})] \quad (5)$$

补电开始时间  $T_{ij}^{bs}$  和补电结束时间  $T_{ij}^{be}$  分别为式(6)~式(7):

$$T_{ij}^{bs} = \frac{T_{ij}^s + T'_{ij}}{2} \quad (6)$$

$$T_{ij}^{be} = T_{ij}^{bs} + \frac{E_{ij}^b}{p_{ij}^b\eta_{ij}} \quad (7)$$

快速补电对应的充电负荷如式(8)所示:

$$P_{ijt}^b = \begin{cases} p_{ij}^b, T_{ij}^{bs} \leq t \leq T_{ij}^{be} \\ 0, \text{一天内其它时间} \end{cases} \quad (8)$$

考虑白天补电之后, 夜间正式充电所对应的负荷的计算式也可参照式(2)~式(3), 其中需要将  $E_{ij}$  替换为  $E_{ij} - E_{ij}^b$ 。

最后, 将白天补电和夜间正式充电的负荷加合在一起, 就是完整的日内充电负荷, 即式(9):

$$P_{ijt} = \begin{cases} p_{ij}, T_{ij}^s \leq t \leq T_{ij}^e \\ p_{ij}^b, T_{ij}^{bs} \leq t \leq T_{ij}^{be} \\ 0, \text{一天内其它时间} \end{cases} \quad (9)$$

#### 3) 出租车

出租车一天内有 2 次充电, 假定 2 次充电之间的行驶距离为一天行驶距离  $d_{ij}$  的一半, 则第一次充电所对应负荷的计算如式(10)~式(11)所示:

$$T_{ij}^{st1} = T_{ij}^{st1} + \frac{E_{ij}}{2p_{ij}\eta_{ij}} \quad (10)$$

$$P_{ijt}^{T1} = \begin{cases} p_{ij}, T_{ij}^{st1} \leq t \leq T_{ij}^{et1} \\ 0, \text{一天内其它时间} \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$T_{ij}^{st1}$ ——第一次充电开始时间;

$T_{ij}^{et1}$ ——第一次充电结束时间。

第二次充电负荷  $P_{ijt}^{T2}$  的计算可参照式(10)~式(11), 只需要将  $T_{ij}^{st1}$  更换为第二次充电的开始时间  $T_{ij}^{st2}$ 。

最后将 2 次充电的负荷  $P_{ijt}^{T1}$  和  $P_{ijt}^{T2}$  在时间上加和在一起, 就得到了一天完整的充电负荷。

### 2.2.5 电动汽车集群充电负荷计算

在得到各个电车的全天充电负荷之后, 将某个时间点上某类电动汽车下各个电车的充电负荷进行加和, 就得到了该时间点上该类电动汽车的总充电负荷  $P_{jt}^A$ , 由此可以确定该类电动汽车全天充电负荷曲线如式(12)所示:

$$P_{jt}^A = \sum_{i=1}^{S_j} P_{ijt}, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (12)$$

将某个时间点上各类电动汽车的总充电负荷  $P_{jt}^A$  进行加和, 就得到了该时间点上整个电动汽车集群的充电负荷  $P_t^A$ , 由此就可以得到全天充电负荷曲线如式(13)所示:

$$P_t^A = \sum_{j=1}^6 P_{jt}^A \quad (13)$$

## 3 案例仿真

本文将南方某省电动汽车集群作为仿真案例。结合有关政府文件, 该省 2030 年的各类电动汽车数量的预测结果见表 3。其中, 电动私家车考虑低、高 2 种场景, 对应着不同的私家车电动化程度, 而对其它类型电动汽车的数量, 结合 2020 年实际数量和有关机构对 2025 年的数量预估进行线性回归预测。

基于表 3, 对 2030 年各类型电动汽车和整个电动汽车集群的充电负荷进行计算, 结果如图 3~图 5 所示, 相对应的峰值负荷和其发生时间也被提取出来, 结果见表 4。

表 3 2030 年电动汽车数量预测

Tab. 3 Estimate on the number of EVs in 2030

电动汽车类型	数量/万辆		
	2020年	2025年	2030年
公务	7.8	17.7	28.0
出租	6.0	6.0	6.0
网约	10.4	13.2	16.0
公交	6.7	9.6	9.6
物流	9.6	20.6	31.6
私家(低场景)			200.0
私家(高场景)	19.6	100.0	300.0
集群(低场景)			291.2
集群(高场景)	60.1	167.1	391.2

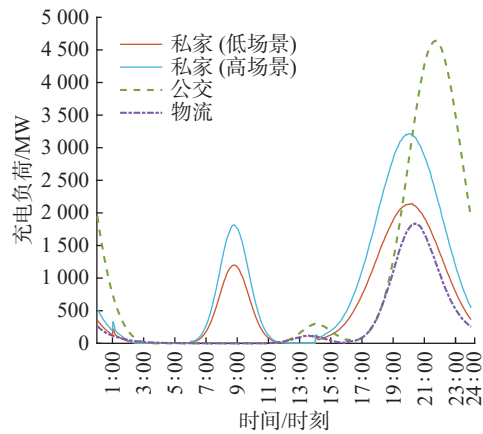


图 3 电动私家车、公交车和物流车的充电负荷曲线

Fig. 3 Charging load curves of private EVs, electric buses and logistics EVs

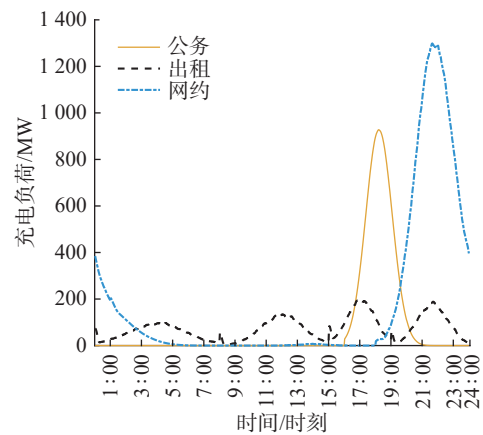


图 4 电动公务车、出租车和网约车的充电负荷曲线

Fig. 4 Charging load curves of official EVs, electric taxis and online ride-hailing EVs

由图 3 可见, 公交车充电负荷高峰在 20:00—23:00 之间, 充电负荷在 18:00—21:00 间快速上升,

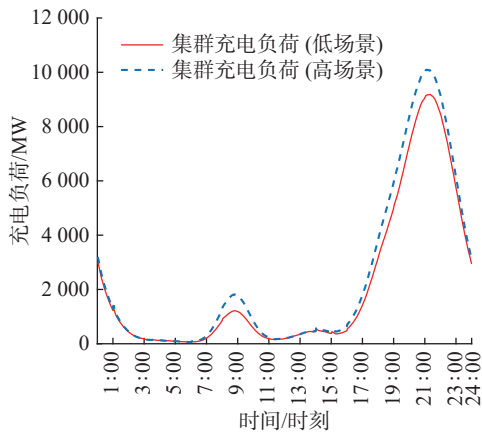


图5 不同场景下电动汽车集群的充电负荷曲线  
Fig. 5 Charging load curves of EV cluster under different scenarios

表4 充电负荷峰值与发生时间  
Tab. 4 Peak charging load and occurring time

电动汽车类型	充电负荷峰值/MW	发生时间
公务	927.6	18:12
出租	198.9	17:02
网约	1 298.5	21:38
公交	4 639.5	21:46
物流	1 837.9	20:24
私家(低场景)	2 145.1	20:04
私家(高场景)	3 210.4	20:02
集群(低场景)	9 188.2	21:20
集群(高场景)	10 092.7	21:12

而在过了 21:00 后迅速下降。私家车总充电负荷曲线有 2 个高峰, 一个位于 18:00—22:00, 另一个位于 8:00—10:00, 分别对应夜间在家中和白天在工作地点充电。但白天的峰值比夜晚的要低很多, 低约 44%, 这是因为相对更少的私家车选择在工作地点充电。

根据图 4, 电动物流车、公务车和网约车的充电高峰分别位于 19:00—22:00、17:00—19:00 和 21:00—23:00 间, 即在其结束白天服务或运营之后。电动出租车有 4 个较为接近的充电负荷峰值, 分别位于约 4:30、12:00、17:00 和 21:30。

图 3 还反映公交车和物流车在白天 11:00—16:00 间也有一定的充电负荷, 这说明有一部分公交车和物流车由于夜晚充电时长或者电池容量的限制, 所充电量无法满足全天耗电需求, 需要在白天快速

补电。

表 4 显示在所有电动汽车类型中, 公交车有着最高的充电负荷峰值, 达到 4 639.5 MW, 虽然数量上私家车是公交车的 20~30 倍, 但其充电负荷峰值最高只有 3 210.4 MW, 不到公交车的 70%。这主要是因为公交车日均行驶里程较高且每公里耗电量较大, 导致每天充电量较大, 即使采用快充, 其充电时间也不会很短, 这样就会出现大量公交车在某个时刻同时充电, 再考虑其较高的充电功率, 充电负荷峰值自然较高。相比之下, 虽然电动私家车数量高很多, 但其日均行驶里程和耗电水平都要低很多, 每天所需充电量较低, 再考虑其大部分采用慢充, 充电负荷峰值也就不会特别高。

表 4 中的结果同样反映, 电动私家车普及程度对其总充电负荷峰值影响较大。比如 2030 年, 高场景下的私家车充电负荷峰值比低场景下的高约 50%。可以预计的是, 随着未来电动私家车数量的继续增长, 其充电负荷峰值也将增大, 甚至可能超过电动公交车的充电负荷峰值。此外, 表 4 还显示, 相比其它车型, 电动出租车的负荷水平要低很多, 这主要有 2 方面原因: (1) 电动出租车相比其它类型电动车数量较低; (2) 出租车的开始充电时间在一天内分布比较分散, 并且因为采用快充而充电时间较短, 较难出现大量出租车在某个时刻同时充电。

根据表 4 和图 5, 整个电动汽车集群的充电高峰在 19:00—23:00 间, 峰值时间在 21:10—21:20 之间, 峰值最高可达 10.092 7 GW。电动汽车集群在白天 8:00—10:00 间也有一个充电高峰, 但其只有夜间峰值的 18%~20%。应该指出的是, 表 4 中集群的充电负荷峰值不是各类型电动汽车充电负荷峰值的简单累加, 这是因为不同类型电动汽车充电负荷峰值往往发生在不同时间, 比如公务车的峰值时间比较早, 而公交车的最晚。此外, 低场景和高场景下集群充电负荷曲线间的区别反映了不同场景下电动私家车充电负荷间的差别。

## 4 结论

本文提出了一种电动汽车集群充电负荷的计算方法, 可以考虑从私家车、公交车、出租车、公务车、网约车到物流车共 6 种电动车型, 能够利用概率模型描述各类车型出行和充电行为的随机性, 并考虑

快慢充和白天快速补电等充电细节。

本文以南方某省作为仿真案例,结果显示所提出的方法能够提供各类型电动汽车和整个集群的日内充电负荷曲线,并可以给出相对应的负荷峰值大小和峰值发生时间。案例分析也发现在所有电动汽车类型中,公交车的充电负荷峰值最高,达到 4 639.5 MW,其次是私家车,不到公交车的 70%,而出租车的最低,只有 198.9 MW。虽然数量上电动私家车是电动公交车的数十倍,但公交车充电量更大且充电功率更高,公交车充电负荷峰值更高。然而随着未来电动私家车规模的快速增大,其充电负荷峰值可能超过公交车对应的峰值。计算结果也表明整个电动汽车集群充电高峰发生在夜晚 19:00—23:00,负荷峰值可达 10.092 7 GW。整个集群在白天 8:00—10:00 间也有一个小充电高峰,但峰值只有夜间峰值的不到 20%。

#### 参考文献:

- [1] 童瑞咏,毛保华,魏润斌,等.碳达峰目标下的汽车电动化碳排放效果研究[J].公路交通科技,2023,40(2):238-245. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.02.029.  
TONG R Y, MAO B H, WEI R B, et al. Study on carbon emission reduction effect of automotive electrification under goal of carbon peaking [J]. *Journal of highway and transportation research and development*, 2023, 40(2): 238-245. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.02.029.
- [2] 赵子贤,邵超峰,陈珏.中国省域私人电动汽车全生命周期碳排放效果评估[J].环境科学研究,2021,34(9):2076-2085. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.09.  
ZHAO Z X, SHAO C F, CHEN J. Effects of private electric vehicles on carbon emission reduction in China during whole life cycle [J]. *Research of environmental sciences*, 2021, 34(9): 2076-2085. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.09.
- [3] 新华社.我国新能源汽车保有量达 1 310 万辆 呈高速增长态势[EB/OL].(2023-01-11)[2023-08-02].[https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content\\_5736281.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736281.htm).  
Xinhua News Agency. The number of new energy vehicles in China reached 13.1 million, showing a rapid growth trend [EB/OL]. (2023-01-11) [2023-08-02]. [https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content\\_5736281.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736281.htm).
- [4] 北极星储能网.中汽协:2022年新能源汽车销量688.7万辆同比增长93.4%[EB/OL].(2023-01-13)[2023-08-02].<https://news.bjx.com.cn/html/20230113/1282863.shtml>.  
Polaris Energy Storage Network. China Automobile Association: in 2022 new energy vehicles sales in 6.887 million year-on-year growth of 93.4% [EB/OL]. (2023-01-13) [2023-08-02]. <https://news.bjx.com.cn/html/20230113/1282863.shtml>.
- [5] 高赐威,张亮.电动汽车充电对电网影响的综述[J].电网技术,2011,35(2):127-131. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2011.02.020.  
GAO C W, ZHANG L. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid [J]. *Power system technology*, 2011, 35(2): 127-131. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2011.02.020.
- [6] 胡思洋,杨健维,廖凯,等.计及大规模电动汽车接入的配电网故障分析方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(16):33-46. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211501.  
HU S Y, YANG J W, LIAO K, et al. Fault analysis method for an urban distribution network considering large-scale electric vehicle access [J]. *Power system protection and control*, 2022, 50(16): 33-46. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211501.
- [7] 贾俊,范炜豪,吕志鹏,等.用于电动汽车集群并网的直流变压器启动研究[J].发电技术,2023,44(6):875-882. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22099.  
JIA J, FAN W H, LÜ Z P, et al. Research on startup of DC transformer for electric vehicle cluster grid-connection [J]. *Power generation technology*, 2023, 44(6): 875-882. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22099.
- [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. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.01.008.  
CHEN L, LU S Y. Research on the influence of electric vehicle charging on distribution network of residential district [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(1): 51-58. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.01.008.
- [9] LUO Z W, HU Z C, SONG Y H, et al. Optimal coordination of plug-in electric vehicles in power grids with cost-benefit analysis—part II: a case study in China [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2013, 28(4): 3556-3565. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2252028.
- [10] LUO Z W, HU Z C, SONG Y H, et al. Optimal coordination of plug-in electric vehicles in power grids with cost-benefit analysis—Part I: enabling techniques [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2013, 28(4): 3546-3555. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2262318.
- [11] 蒋林洳,万伟江,丁霄寅,等.一种基于直接蒙特卡洛法的电动汽车充电负荷模型[J].供用电,2018,35(4):20-25,13. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2018.04.004.  
JIANG L R, WAN W J, DING X Y, et al. Electric vehicle charging load model based on direct Monte-Carlo method [J]. *Distribution & utilization*, 2018, 35(4): 20-25, 13. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2018.04.004.
- [12] 锁军,李龙,贺瀚青,等.考虑交通路况的电动汽车充电负荷预测[J].电网与清洁能源,2022,38(10):141-147. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2022.10.017.  
SUO J, LI L, HE H Q, et al. Load forecasting of electric vehicle charging considering traffic conditions [J]. *Power system and clean energy*, 2022, 38(10): 141-147. DOI: 10.3969/j.issn.1674-



- 3814.2022.10.017.
- [13] SZINAI J K, SHEPPARD C J R, ABHYANKAR N, et al. Reduced grid operating costs and renewable energy curtailment with electric vehicle charge management [J]. *Energy policy*, 2020, 136: 111051. DOI: [10.1016/j.enpol.2019.111051](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111051).
- [14] 张美霞, 张倩倩, 杨秀, 等. 基于交通-电力均衡耦合的电动汽车快充站与配电网联合规划 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 51-63. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.236015](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.236015).  
ZHANG M X, ZHANG Q Q, YANG X, et al. Joint planning of electric vehicle fast charging stations and distribution network based on a traffic-electricity equilibrium coupling model [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(11): 51-63. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.236015](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.236015).
- [15] 李阳, 吴伟杰, 林勇, 等. 考虑电动汽车行驶特性的工业园区电动汽车充电设施规划 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(增刊1): 7-14. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.002).  
LI Y, WU W J, LIN Y, et al. Electric vehicle charging facilities planning in industrial parks considering the driving characteristics of electric vehicles [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5( Suppl.1 ): 7-14. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.002).
- [16] 石天琛, 杨焯, 刘明光, 等. 基于有限信息的电动汽车用户充电行为特征识别 [J]. *电力建设*, 2024, 45(10): 69-77. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2024.10.007](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2024.10.007).  
SHI T C, YANG Y, LIU M G, et al. Identification of charging behavior characteristics of electric vehicle users based on limited information [J]. *Electric power construction*, 2024, 45(10): 69-77. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2024.10.007](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2024.10.007).
- [17] ZHENG Y C, SHAO Z Y, ZHANG Y M, et al. A systematic methodology for mid-and-long term electric vehicle charging load forecasting: the case study of Shenzhen, China [J]. *Sustainable cities & society*, 2020, 56(1): 102084. DOI: [10.1016/j.scs.2020.102084](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102084).
- [18] 王震坡, 梁兆文. 中国新能源汽车大数据研究报告-2022(3版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.  
WANG Z P, LIANG Z W. Annual report on the big data of new energy vehicle in China (2022) (3rd ed. ) [M]. Beijing: China Machine Press, 2022.
- [19] SU J, LIE T T, ZAMORA R. Modelling of large-scale electric vehicles charging demand: a New Zealand case study [J]. *Electric power systems research*, 2019, 167: 171-182. DOI: [10.1016/j.epsr.2018.10.030](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.030).
- [20] 王中阳, 王威, 戴建卓, 等. 基于弹性系数法和千人保有量法的陕西省电动汽车保有量的预测 [J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(5): 142-147. DOI: [10.3969/j.issn.1674-3814.2016.05.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3814.2016.05.026).  
WANG Z Y, WANG W, DAI J Z, et al. Forecasting of electric vehicle quantity based on the elastic coefficient and Shaanxi vehicles ownership per thousand people method [J]. *Power system and clean energy*, 2016, 32(5): 142-147. DOI: [10.3969/j.issn.1674-3814.2016.05.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3814.2016.05.026).
- [21] 令文君, 雷兵, 李于达. 南方五省区电动汽车市场分析与市场规模预测 [J]. *中国能源*, 2020, 42(7): 42-47. DOI: [10.3969/j.issn.1003-2355.2020.07.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2355.2020.07.008).  
LING W J, LEI B, LI Y D. Study of the present situation analysis and the market scale forecast in the electric vehicle market of the five provinces(regions) in southern China [J]. *Energy of China*, 2020, 42(7): 42-47. DOI: [10.3969/j.issn.1003-2355.2020.07.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2355.2020.07.008).
- [22] 电车资源行业研究院. 2023年新能源物流车市场分析半年报 [EB/OL]. (2023-07-22) [2023-08-03]. <https://www.evpartner.com/news/215/detail-67880.html>.  
Trams Resources Industry Research Institute. In 2023, new energy vehicle logistics market analysis half annuals [EB/OL]. (2023-07-22) [2023-08-03]. <https://www.evpartner.com/news/215/detail-67880.html>.

#### 作者简介:



游磊

游磊(第一作者, 通信作者)

1994-, 男, 博士, 主要研究方向为电力系统规划(e-mail)[youlei4031184@outlook.com](mailto:youlei4031184@outlook.com)。

金小明

1963-, 男, 教授级高级工程师, 学士, 主要从事电力系统规划和直流输电相关研究工作(e-mail)[jinxiaoming@gedi.com.cn](mailto:jinxiaoming@gedi.com.cn)。

刘云

1983-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统规划研究工作(e-mail)[liuyun@gedi.com.cn](mailto:liuyun@gedi.com.cn)。

(编辑 赵琪)