

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.027

# 基于交通信息的多类型电动汽车综合充电需求研究

李琳玮, 宁光涛, 俞悦, 陈明帆, 陈奕达, 何礼鹏

(海南电网有限责任公司, 海南 海口 570203)

**摘要:**为预防电动汽车大量普及后其充电不确定性对配网的冲击,文中提出了一种基于动态交通信息,考虑大规模、多类型电动汽车接入的充电需求联合建模方法。从电动汽车作为交通工具这一特性入手,基于不同类型电动汽车的运行特点,结合交通信息,建立了对应的运行时空模型。考虑快充和慢充2种模式,研究了各类电动汽车的充电行为,并配合其运行特性构建充电需求模型。结合用户日行驶里程,提出基本运行周期,并采用蒙特卡洛模拟法,对不同工作日下午多类型电动汽车的综合充电需求分布进行测算。仿真结果验证了建模方法的可行性,并表明多类型电动汽车的接入将会在整体上为配网带来多个用电需求高峰。

**关键词:**交通信息;电动汽车;充电需求;蒙特卡洛模拟法

**中图分类号:**TM714

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)01-0191-09

## 0 引言

近年来,电动汽车凭借其零排放的特点,得到了各国政府的大力推广,具有迅猛的发展势头和良好的发展前景。然而,电动汽车充电功率较高,大规模电动汽车的接入必然会给配网带来巨大的负荷冲击,引发电网稳定问题。因此,需要对大规模电动汽车充电需求进行准确建模,为电动汽车的有序充电和充电设施及配网的科学规划和调度提供依据<sup>[1]</sup>。

相关学者已经对电动汽车充电需求建模问题进行了大量研究。文献[2]结合车辆GPS记录的出行数据,抽取出行距离和起止时间信息,计算规模化电动汽车的充电负荷。文献[3]考虑快充、慢充、换电多种充电模式,利用蒙特卡洛法对充电站进行概率负荷建模。文献[4—5]对多种类型电动汽车进行综合建模,得到了充电负荷的时间分布。文献[6]从用户实际运行里程数据和电池利用率出发,提出了计及多日一充模式的电动汽车充电负荷建模策略,得到了更符合私家车用户充电习惯的结果。这些文献主要从时间层面对电动汽车充电需求进行了分析和测算。目前,对电动汽车充电需求时空建模层面的研究也成为热点。文献[7]考虑多种充电模式及多类型电动汽车,引入行驶汽车比例系数拟态实际运行情况,建立了不同功能区的充电负荷模型,但并未深入分析电动汽车的空间特性。文献[8]采用动态停车生成率模型,结合电动汽车停车特性,基于电动汽车日行驶特点,建立了私家车充电需求时空分布模型。文献[9—12]基于私家

车出行规律,利用出行链理论,并在一定程度上考虑了路况信息,完成了对私家车充电负荷的时空建模。上述文献在充电需求空间特性的分析上均取得了良好的效果,但具体研究对象主要为私家车。综上,目前还缺乏对多类型电动汽车空间特性的联合研究和深入分析,未能建立一个全面的社会电动汽车综合充电需求模型。

随着电动汽车渗透率的不断提高,多种类型的电动汽车功能不同,运行模式上也存在差异。然而,不同类型电动汽车均作为交通工具行驶于城市路网中,其运行状态都会受到动态交通信息,即不同时段下城市交通指标信息(如交通拥堵指数)的影响。因此,文中从电动汽车运行角度出发,结合交通信息将不同电动汽车联合在统一宏观计算框架中,提出了一种综合多类型电动汽车的充电需求建模策略。首先,结合动态交通信息,分析了私家车、商务车、公交车及出租车对应的运行特点并建立了模型;然后,考虑快充和慢充,分析了不同类别电动汽车的充电行为;最终,提出典型运行周期以研究多类型电动汽车在不同运行日充电需求的差异,并结合运行特性模型和充电行为,基于蒙特卡洛法对整体充电需求进行了测算。

## 1 结合交通信息的各类型电动汽车运行特性建模

目前,社会上的电动汽车按照功能可划分为商务车、私家车和公共交通工具。其中,公共交通工具又可以进一步划分为公交车和出租车。这些车辆由于社会功能存在差异,在运行特点上也有所不同。此外,电动汽车作为交通工具,其运行状态受

到路网交通状态的深层影响。因此,文中结合交通信息,对各类型电动汽车进行运行方式分析以及建模。

### 1.1 基于统计分析的商务车运行特性建模

商务车主要用于工作单位的日常业务活动,通常在白天运行,夜晚停驶。其未执行公务时,一般停在工作单位。电动商务车的行程起点和终点都在工作区,停车特性比较确定,故不需要借助交通信息进一步分析。

假设电动商务车与传统燃油车的行驶习惯相同,则根据家庭出行调查(NHTS)统计数据,可设定其日行驶里程满足对数正态分布<sup>[13]</sup>:

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: $x$ 为商务车日行驶里程; $\mu, \sigma$ 分别为日行驶里程对应的对数均值和标准差。

同时,根据统计数据,可设定电动商务车每天行程结束时间服从正态分布,结合对应的分布进行抽样,可得到每辆电动商务车每天运行的距离和行程终止的时间,实现对其运行状态的描述。

### 1.2 基于出行链理论和动态交通信息的私家车运行特性建模

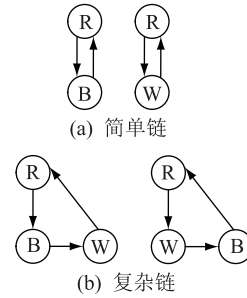
私家车是居民日常出行的重要交通工具,其出行时间以及出行距离与用户习惯和目的地密切相关,具有很高的随机性。

出行链能够记录用户每次出行的起止点、行驶距离、行程开始和结束时间,实现对用户全天活动信息的准确时空建模<sup>[14]</sup>。故文中采用出行链理论描述私家车用户的日常出行时空变化特点,并构建以家为起止点的出行链。根据对NHTS2009数据的分析结果,私家车平均出行链长度为3.02,且文献<sup>[15]</sup>统计指出私家车用户除起止点外出行目的地数量为1的概率为76.86%。因此,结合对城市的功能性分区,可将出行链分为2种类型:

(1) 简单链。出行目的唯一的出行链,主要类型如图1(a)所示。

(2) 复杂链。长度为3,额外目的地有2个的出行链,其主要类型如图1(b)所示。

根据NHTS数据的分析可得,在时间层面,以家为每日出发起点的私家车用户,可设定其首次出行时间服从正态分布;在空间层面,单次行程起点和终点之间的行驶距离基本满足对数正态分布。采用马尔科夫链描述电动私家车的空间转移过程,则按照文中设置的功能区和出行链种类,有电动私家车空间转移概率矩阵如式(2)所示:



R—居住区; B—商业区; W—工作区

图1 出行链

Fig.1 Trip chain

	R	B	W
R	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$
B	$p_{21}$	$p_{22}$	$p_{23}$
W	$p_{31}$	$p_{32}$	$p_{33}$

(2)

式中: $p_{ij}$ 为电动私家车从区域*i*运行到*j*的概率,可根据当地居民调研数据统计确定。

私家车在行驶过程中的运行时间主要受到交通状态影响,如早晚高峰交通拥堵,路上花费时间较其他时段多。因此,需结合动态交通信息以准确描述私家车运行时间信息。若电动私家车完成一个行程,则时空信息变化和交互关系如式(3)所示:

$$\begin{cases} T_{j,arr} = T_{i,lea} + T_{ij} = T_{i,lea} + \frac{L_{ij}}{v_{mean,m}} \\ T_{j,lea} = T_{j,arr} + T_{j,stop} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_{i,lea}, T_{j,arr}, T_{j,lea}$ 分别为电动私家车离开起点*i*、到达以及离开目的地*j*的时间; $L_{ij}, T_{ij}$ 分别为由*i*到*j*的行程距离和行驶时间; $T_{j,stop}$ 为私家车在目的地*j*停留的时间,在商业区和工作区服从对数正态分布<sup>[16]</sup>;  $v_{mean,m}$ 为路网中车辆在时段*m*的平均行驶速度,可通过城市的实时交通拥堵指数换算得到。

结合出行链理论和动态交通信息,电动私家车每次行程的起止信息以及行程时间都可得到准确的描述,从而可建立对应的运行状态时空模型。

### 1.3 基于运行线路和动态交通信息的公交车运行特性建模

公交车主要服务于居民的日常出行,有相对固定的运营时间和运行路线,具有很强的时空规律性。公交车总站一般设置在人流量较大的居民区或商业区附近,且每条线路设有固定的发车间隔,每辆公交车有对应的离站时间。因此公交车一次运行的距离等于线路的长度,出发起始时刻等于对应离站时间,不考虑公交车每站停靠时间的影响,公交车运行的主要不确定性来源于运行线路上的交通状况。

结合城市实时拥堵指数,换算对应的车辆平均行驶速度,可得到公交车每次返回总站的时间:

$$T_{k, \text{re}} = T_{k, \text{s}} + \frac{L_{\text{route}}}{v_{\text{mean}, m}} \quad (4)$$

式中:  $T_{k, \text{s}}$ ,  $T_{k, \text{re}}$  分别为待研究公交车第  $k$  次运行的发车和回站时间;  $L_{\text{route}}$  为公交车运营线路长度。

#### 1.4 基于空载率和动态交通信息的出租车运行特性建模

出租车每次载客运行都受到上次载客的影响,在运行地点和时间分布上有较大的随机性,难以对单个出租车进行精确建模。而根据宏观统计数据,出租车的运行主要取决于居民出行规律:高峰期集中在早晚高峰,在凌晨和深夜由于出行人数少,出租车具有较高的空载率,其他时段出租车的出行需求基本维持在较高水平<sup>[17]</sup>;同时,出租车多分布在人流密度较高的地区。此外,随着电池技术的不断提高,目前电动汽车的续航里程持续上升,例如深圳电动出租车的主要车型比亚迪 E6,其续航里程达到 300 km,可以和传统燃油出租车一样进行换班制。因此,除去司机的换班及休息时间,电动出租车已可实现全天候运行。

结合上述宏观运行特点,文中提出一种基于空载率和动态交通信息的电动出租车宏观运行状态时空建模方法。

空载是出租车运行的显著特征,代表出租车的非载客运行,空载率则是衡量该现象的指标:

$$r = 1 - \frac{L_{\text{pass}}}{L_{\text{Total}}} \quad (5)$$

式中:  $r$  为空载率;  $L_{\text{pass}}$ ,  $L_{\text{Total}}$  分别为出租车一天运行的载客里程和总里程。

出租车的主要运营目标为盈利,在空驶时主要为寻客,速度相对较慢,而在载客运行时则以交通状况所允许的最大速度行驶,以提高运行效率。而一个时段内空驶和载客状态分布并不确定,考虑交通状况随时间动态变化,可结合空载率定义推导出出租车在对应时段内的平均运行速度:

$$T_{\text{run}, m} = \frac{r_m x_m}{v_{\text{em}}} + \frac{(1 - r_m) x_m}{v_{\text{mean}, m}} \quad (6)$$

$$v_{\text{cab}, m} = \frac{x_m}{T_{\text{run}, m}} = \frac{v_{\text{em}} v_{\text{mean}, m}}{r_m v_{\text{mean}, m} + (1 - r_m) v_{\text{em}}} \quad (7)$$

式中:  $x_m$ ,  $T_{\text{run}, m}$  分别为设定的第  $m$  个时段内出租车运行总里程和实际行驶时长,其取值不影响最终结果;  $v_{\text{em}}$ ,  $v_{\text{cab}, m}$  分别为出租车空载速度和第  $m$  时段内的平均行驶速度;  $r_m$  为根据出租车公司 GPS 等运行数据统计得到的第  $m$  个时段空载率。

根据出租车公司的 GPS 等数据,还可得到对应时段内出租车的区域宏观分布情况如下:

$$\begin{cases} f(U_{\text{area}} = i) = p_{i, m} \\ \sum_{i=1}^z p_{i, m} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U_{\text{area}}$  为电动出租车所处位置;  $p_{i, m}$ ,  $z$  分别为统计得到的第  $m$  个时段出租车位于区域  $i$  的概率和区域的数量。

## 2 计及 2 种充电模式的电动汽车充电需求建模与计算

建立运行特性模型后,即可提供电动汽车基本的时空信息。在此基础上,需进一步判断电动汽车充电条件,以构建电动汽车的充电需求分布模型。本节首先对各类型电动汽车进行充电行为分析,之后结合运行特性模型进行充电需求建模与计算。

### 2.1 不同类型电动汽车充电行为分析

电动汽车通常以快充和慢充 2 种模式进行电能的补充<sup>[18]</sup>。快速充电通过工作时的高电压大电流产生较高的充电功率,充电时间较短,但对电池冲击较大。慢充工作电流一般在 16~32 A,且工作电压较低,充电时间长,但电动汽车在家或者停车场的充电桩上进行电能补充,能够对电池进行深入充电。目前,慢充模式是大多数电动汽车的主要充电方式。

为便于分析电动汽车充电行为,文中做出如下假设:(1) 电动汽车平均每公里耗电量恒定;(2) 不论慢充还是快充,电动汽车在充电过程中充电功率恒定;(3) 由于文中为功能区级别的宏观充电需求建模,为后续充电设施规划做基础,考虑到充电设施的服务半径,电动汽车往返于充电站花费的额外时间和距离暂时忽略不计。

#### 2.1.1 商务车

电动商务车运行起止点为工作单位,且运行时间主要集中在白天,因此设定其在一天行程结束之后即在工作单位停车场采用慢充进行电能补充。结合 1.1 节,电动商务车行程结束时间和全天运行里程均可通过抽样得到,则有起始充电时刻的荷电状态(state of charge, SOC)为:

$$S(T_{\text{sc}}) = S(T_{\text{ini}}) - \frac{\gamma x_{\text{total}}}{C_b} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $T_{\text{ini}}$ ,  $T_{\text{sc}}$  分别为电动商务车起始运行时刻和开始充电时刻;  $C_b$  为电池容量;  $\gamma$  为商务车平均每公里耗电量;  $x_{\text{total}}$  为一天运行的总里程。

商务车在工作区充电直至充满为止,其充电时

长可表示如下:

$$T_c = \frac{[1 - S(T_{sc})]C_b}{\eta P_{\text{slow}}} \quad (10)$$

式中:  $T_c$  为商务车充电时长;  $\eta$  为充电桩效率;  $P_{\text{slow}}$  为慢充功率。

### 2.1.2 私家车

结合 1.2 节, 私家车主要充电地点为工作区、商业区和居民区的停车场, 方式为慢充。根据统计数据<sup>[19]</sup>, 84.25% 私家车用户日运行里程小于 60 km, 结合当前电动汽车续航里程(大于 150 km), 私家车并不需要每日一充。考虑电池利用率和用户充电自主性, 文中设定私家车到达目的地时, 若电池荷电状态小于设定阈值, 才开始进行慢充, 直至充满或离开该目的地。需要说明的是, 此处的阈值可结合当地用户充电行为具体信息进行差异化设置。综上, 对应的充电时空信息为:

$$\begin{cases} S(T_{j,\text{lea}}) = S(T_{j,\text{arr}}) + \frac{\eta P_{\text{slow}} T_c}{C_b} \times 100\% \\ S(T_{j,\text{arr}}) \leq S_{\text{thre}} \\ T_c = \min\{T_{j,\text{stop}}, T_{c,\text{full}}\} \\ U_{\text{area}} = j \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $S_{\text{thre}}$  为设定的慢充荷电状态阈值;  $T_{c,\text{full}}$  为私家车充满电所需时长;  $j$  为根据出行链理论推算得到的区域编号。

除目的地慢充模式外, 设定私家车在运行过程中, 若剩余电量无法保证在电量过低之前到达目的地, 即私家车荷电状态在途中达到低电量阈值时, 将选择在途中进行快速应急充电。考虑到快充的速度, 设定私家车将充至满电状态再继续进行剩余行程, 充电区域按照电动汽车当前行驶距离、此次行程距离以及起止点确定。相关的充电条件为:

$$P_c = P_{\text{fast}} \quad S(T_{i,\text{lea}}) - \frac{\gamma L_{ij}}{C_b} \times 100\% \leq S_{\text{dan}} \quad (12)$$

式中:  $P_c, P_{\text{fast}}$  分别为电动汽车充电功率和快充功率;  $S_{\text{dan}}$  为电池低电量阈值。

结合充电判定条件和时长信息, 与原始的出行链信息进行融合, 可得到私家车全天充电需求分布情况。

### 2.1.3 公交车

结合 1.3 节, 由于公交车每次行程从总站开始, 可设定在公交总站建设充电设施对其进行集中供电。由于公交车在运行时段具有固定的发车时间, 且在出行高峰期, 车站的发车间隔较短, 因此电动公交车每次行程结束后在车站的停车时间较短, 只

能进行快充。而在非运行时间, 即深夜至第二天早晨, 电动公交车有充足时间充电, 采用慢充直至充满, 计算如式(10)所示。

为延长电池寿命, 降低快充次数, 只有当公交车回站后荷电状态小于设定阈值时才进行快速充电, 其计算如式(11)所示。其中, 充电区域在车站所处区域, 停车时长为:

$$T_{k,\text{stop}} = T_{k+1,\text{s}} - T_{k,\text{re}} \quad (13)$$

### 2.1.4 出租车

结合 1.4 节, 由于出租车的载客运行和盈利性质, 其具有日运行里程长、停驶时间短的特点。故电动出租车采用快充模式进行电能补充, 且可能存在一日多充现象。

出于提高电池利用率和增长有效运营时间的考虑, 设定电动出租车在电量低于设定阈值时才进行快充。文献[20]指出, 出租车司机也会选择换班和用餐时间顺便充电。因此, 文中设定 2 个充电阈值, 即应急充电阈值  $S_{\text{hush}}$  和附带充电阈值  $S_{\text{add}}$ , 且有:

$$S_{\text{hush}} < S_{\text{add}} \quad (14)$$

此外, 在应急充电时, 设定出租车司机倾向于将电池充满以保证持续运行里程, 而在附带充电时, 充电时长还要受到司机停车时间的限制, 文中设置停车时长服从正态分布。故出租车充电时间计算如式(11)所示, 充电地点根据充电起始时刻对应的时段区域分布概率判定, 即式(8)。

## 2.2 基于交通信息的多类型电动汽车充电需求建模与计算方法

基于第 1 章建立的各类电动汽车运行特性模型, 结合 2.1 节的充电行为分析, 考虑不同充电模式特点, 即可对不同类型电动汽车的充电需求进行建模。

综合各类型电动汽车充电需求分布模型, 对同一时刻同一区域内不同类型电动汽车的充电需求功率进行累加即可得到该区域内对应时刻整体充电需求功率, 实现对综合充电需求的计算如下:

$$\begin{cases} P_{i,t,\text{total}} = \sum_{o=1}^4 P_{i,t,o} \\ P_{i,t,o} = \sum_{w=1}^{n_o} P_{i,t,o,w} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $P_{i,t,\text{total}}, P_{i,t,o}$  分别为区域  $i$  在  $t$  时刻的整体充电需求和第  $o$  类电动汽车产生的充电需求;  $P_{i,t,o,w}$  为第  $w$  辆  $o$  类电动汽车在区域  $i$  及时刻  $t$  产生的充电需求;  $n_o$  为第  $o$  类电动汽车的数量。

由于文中设定电动私家车实行阈值充电模式,



若阈值设定较低,电动私家车会进入多日一充模式,在不同工作日会表现出不同的充电需求水平。因此,为更好地描述电动汽车整体充电需求的日变化情况,文中结合私家车日行驶里程平均值,基于文献[5]提出的元窗口,提出电动汽车基本运行周期  $R$ ,计算如下:

$$R \geq \text{round} \left( \frac{L_{\max}}{L_{\text{mean}}} \right) + 1 \quad (16)$$

式中:round( )为四舍五入函数; $L_{\max}$ 为私家车单次充电续航里程; $L_{\text{mean}}$ 为统计得到的私家车平均日行驶里程。

基于交通信息,根据电动汽车基本运行周期,利用蒙特卡洛法对多类型电动汽车的综合充电需求分布进行测算。基于电动汽车的行程开始时间、单次行程距离、停车时间等概率分布,每次仿真抽取各车辆的行程起止时间、距离信息以及空间位置信息,确定电动汽车的充电需求时空信息,按照式(15)累加各车辆充电需求,仿真一个基本运行周期后进入下次仿真,最后平均多次仿真结果,即可得到多类型电动汽车的综合充电需求分布,基本流程如图2所示。

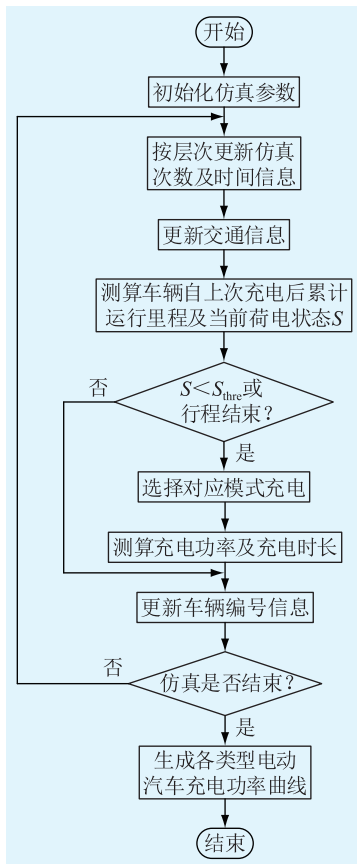


图2 多类型电动汽车综合充电需求计算流程  
Fig.2 Calculation process of comprehensive charging demand for multiple types of electric vehicles

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真算例设计

根据前文理论模型,设计简单城市模型测算多类型电动汽车的综合充电需求。图3为设计的研究区域,按照功能分为居住区、商业区、工作区。

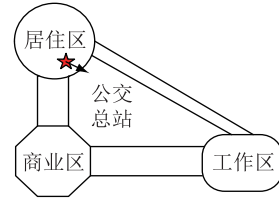


图3 待研究区域  
Fig.3 Study area

结合运行特性模型,根据统计得到的日常出行规律,设定电动汽车的出行时间、日行驶里程等分布参数。在交通状况方面,参考文献[11],将工作日划分为5个时段,相关信息如表1所示。同时,假设车辆均运行在主干道上,自由流速度为35 km/h。交通拥堵指数反映城市路网拥堵情况。

表1 各时段交通状况

Table 1 Traffic conditions at different times

序号	时间范围	交通拥堵指数	时段描述
1	0:00~7:00	0.5~1.5	凌晨时段
2	7:00~10:00	6.6~7.1	早高峰
3	10:00~16:00	2.0~4.1	一般时段
4	16:00~20:00	6.5~7.2	晚高峰
5	20:00~24:00	0.5~1.5	深夜时段

结合文献[21],设定电动出租车主要停驶时段分为3个,且停驶开始时间和持续时长均满足正态分布,  $(\mu, \sigma)$  和  $(\mu_1, \sigma_1)$  分别为两者对应的均值与标准差,主要信息如表2所示。

表2 电动出租车停驶时段

Table 2 Off-hours for electric taxis

时段名称	$\mu/h$	$\sigma/h$	$\mu_1/h$	$\sigma_1/h$
凌晨换班时段	5	0.25	1	0.16
午餐休息时段	12	0.5	1.16	0.25
傍晚换班时段	17	0.25	1	0.16

此外,文中设定有1个公交车总站位于居民区,只有1路公交车,共24辆,路线长度为40 km,其运行时间为6:00~21:00,其中早晚高峰时段发车间隔为5 min,其他时段为10 min。

设定算例区域内共有机动车辆100 000辆,其中电动汽车渗透率设定为10%,充电效率设为90%,电动汽车具体信息及充电阈值分别如表3、表

4 所示, 阈值代表满足充电判定对应的 SOC 设定值。

表 3 电动汽车具体信息

Table 3 Detail information of electric vehicles

类型	数量/辆	续航里程/km	电池容量/(kW·h)	快充功率/kW	慢充功率/kW
商务车	1 000	300	57		7
私家车	8 000	160	24	24	3.5/7
公交车	24	250	324	100	40
出租车	976	300	57	24	

表 4 电动汽车充电阈值设定

Table 4 Charging threshold setting of electric vehicles

类型	商务车	私家车	公交车	出租车
目的地慢充	1	0.3	1	
应急快充		0.1	0.6	0.4/0.2

### 3.2 仿真结果分析

拟定各类电动汽车运行参数后, 设定各类电动车最初均为满电状态, 通过测算设定电动汽车基本运行周期为 5 d, 以确保观察到电动汽车充电需求在不同工作日中的时空变化情况。先运行一个基本运行周期, 以最终时刻各类电动汽车的荷电状态作为初始荷电状态, 再进行真正的仿真(再运行 5 d), 可得到电动汽车的综合充电需求分布。按照图 2 所示流程进行 1 000 次仿真, 分别得到商务车、私家车、公交车、出租车的充电需求分布。

商务车充电需求如图 4 所示。由于商务车充电起始时间设定在晚上, 与下班时间相适应, 且地点为工作单位, 故其充电需求只集中在工作区的夜晚, 并在每天 20:00 左右达到充电高峰。

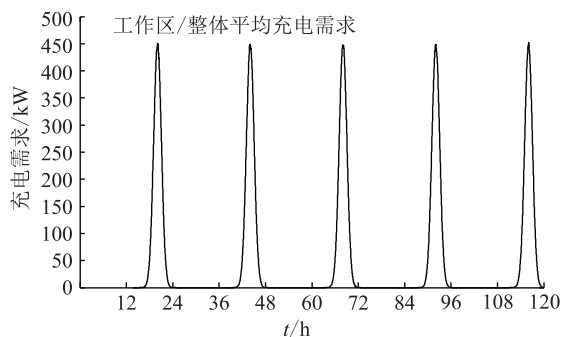


图 4 电动商务车的充电需求分布

Fig.4 Commercial vehicle charging demand distribution

私家车充电需求如图 5 所示。当采用阈值充电模式时, 私家车在不同工作日的充电需求存在差异。实际运行首日, 大量私家车在到达工作单位或商业区后进行电能补充, 两区域的充电需求在上午 9:00 左右到达峰值, 余下电动车也在后续进行充电, 充电需求在傍晚车辆回到居住区后再次出现高

峰, 随后几天私家车的充电需求相对减弱, 且需求曲线也存在差异。说明采用阈值充电模式时, 私家车进入多日一充模式, 可能会在某天对应时段出现集聚充电现象, 使得该日充电需求激增, 加大配网的负担, 也会导致不同工作日充电需求的分布出现变化, 增加了充电需求的不确定性。之外, 电动私家车每天充电需求均会出现 2 个高峰, 第一个出现在上午, 主要反映在工作区和商业区, 第二个高峰出现在傍晚, 主要反映在居住区, 说明私家车的充电需求与居民日常出行规律密切相关。

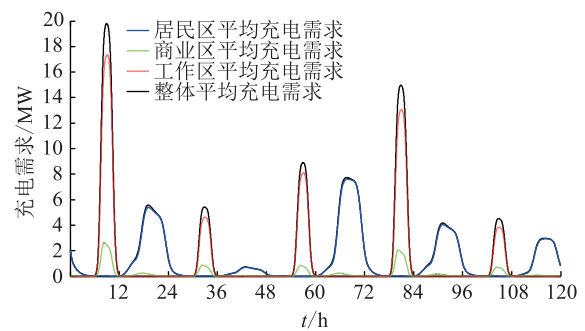


图 5 电动私家车的充电需求分布

Fig.5 Private car charging demand distribution

由于公交车运行较为规律, 因此充电需求较为稳定, 故只研究其中 1 d 的曲线, 如图 6 所示。在居民区, 电动公交车充电需求主要有白天和夜晚两个高峰。在白天, 居民区会出现一个振荡的充电需求峰值, 峰值的波动和公交车的发车间隔有关。因此, 考虑其充电功率的大小, 电动公交车的接入将引起配网用电需求在一定时间内的较大振荡, 给配网运行稳定性造成影响。

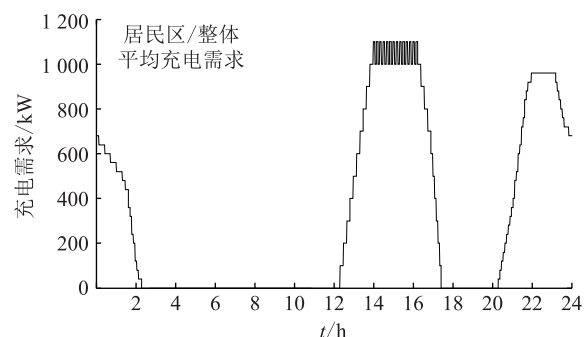


图 6 电动公交车的充电需求分布

Fig.6 Bus charging demand distribution

出租车充电需求如图 7 所示。从分区角度分析, 电动出租车在不同区域均存在较高充电需求, 但一天不同时段内对应分区的充电需求相对水平也会发生变化。在中午时, 工作区充电需求水平最高; 而在晚间时, 商业区相应需求水平较高; 在清晨, 充电需求主要集中在居民区。从整体充电需求

分析,电动出租车全天充电需求主要有3个高峰时段:早晨5:00~6:00、中午11:00~12:00以及晚上17:00~18:00,这与出租车换班及午休时间基本吻合。同时,基本运行周期内充电需求峰值均出现在午休时间,说明经过上午的运营后,大部分出租车电池荷电状态小于附带充电阈值,司机选择午休时顺便进行电能补充。以上分析结果与文献[21]基本吻合,证明了文中采用交通信息对电动出租车进行宏观建模的正确性。同时,文中采用空载率这一宏观统计指标,获取难度小,计算更为简单,因此相较文献[21]在工程实用上具备一定优势。

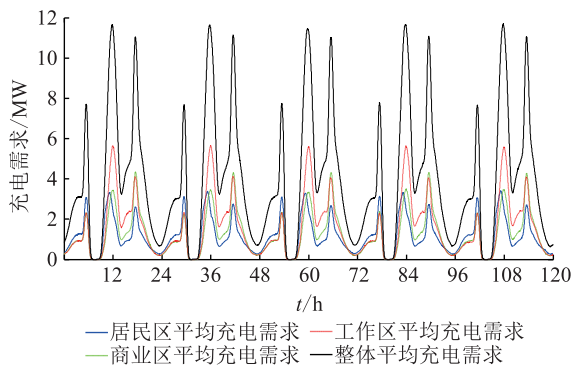


图7 电动出租车的充电需求分布

Fig.7 Taxi charging demand distribution

基于对各类型电动汽车充电需求的建模,累加其充电需求,可得到多类型电动汽车综合充电需求分布曲线如图8所示。

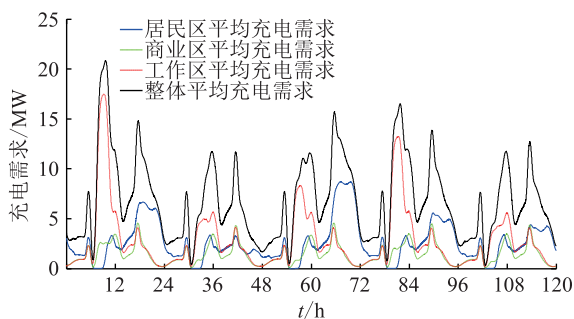


图8 多类型电动汽车的综合充电需求分布

Fig.8 Comprehensive charging demand distribution

在整个电动汽车基本运行周期中,电动汽车充电需求在区域分布上基本呈现出上午及中午工作区充电需求为主,下午及傍晚3个区域需求水平相似,夜晚及凌晨居住区需求水平占优的特点。此外,从综合充电需求的时间分布来分析,受不同类型电动汽车充电特点的影响,研究区域综合充电需求高峰期主要集中在早晨5:00~6:00、上午9:00~12:00及傍晚17:00~19:00多个时段,因此应注意大规模充电汽车接入后,其充电需求与原始用电需求结合后的新峰谷特征。

## 4 结论

文中基于电动汽车作为交通工具这一事实,研究了基于交通信息的多类型电动汽车综合充电需求建模方法。利用动态交通信息联合深入分析各类型电动汽车运行特点,在分析充电行为的基础上,建立对应充电需求模型,并结合蒙特卡洛方法对综合充电需求分布进行测算,主要结论如下:

(1) 基于交通信息和空载率对电动出租车宏观充电需求分布进行建模,可在保证充电需求时间分布准确性的基础上降低计算的难度;

(2) 将私家车存在的多日一充模式计入其充电需求建模及测算中,能够体现电动汽车充电需求在不同工作日的差异性,提高建模的准确性;

(3) 基于综合充电需求测算结果,相关部门可针对快充、慢充需求进行不同类型充电设施的合理选址定容,满足区域内各类型电动汽车的用能需求。同时,配网可针对充电需求带来的新型峰谷特征,预先进行调度方案的调整,抑制大规模电动汽车接入后对电网的冲击。

文中暂未细致考虑交通网络,同时对各类型电动汽车充电需求建模比较粗糙,还需在这些方面进一步改进和扩展。

本文得到海南电网有限公司科技项目(070000-KK52170013)资助,谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 杨波,陈卫,文明浩,等. 电动汽车充电站的概率负荷建模[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16):67-73.  
YANG Bo, CHEN Wei, WEN Minghao, et al. Probabilistic load modeling of electric vehicle charging stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16):67-73.
- [4] 刘琰,何伟哲. 电动汽车充电模式选择与充电负荷计算的研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(10):129-133.  
LIU Yan, HE Weizhe. Research on charging mode selection and charging load calculation of electric vehicles [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(10):129-133.
- [5] 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.
- [6] 徐浩, 苗世洪, 钱甜甜, 等. 计及多日一充模式的规模化电动汽车充电负荷建模策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 129-137.
- XU Hao, MIAO Shihong, QIAN Tiantian, et al. A modeling strategy for charging loads of large-scale electric vehicles considering multi-days spaced charging mode [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 129-137.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 苏小林, 张艳娟, 武中, 等. 规模化电动汽车充电负荷的预测及其对电网的影响[J]. 现代电力, 2018, 35(1): 45-54.
- SU Xiaolin, ZHANG Yanjuan, WU Zhong, et al. Forecasting the charging load of large-scale electric vehicle and its impact on the power grid [J]. Modern Electric Power, 2018, 35(1): 45-54.
- [10] 周翔, 陈杰军, 谢培元, 等. 基于效用最大化原则的电动汽车充电站负荷特性分析方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 1-8.
- ZHOU Xiang, CHEN Jiejun, XIE Peiyuan, et al. Load demand analyzing method for electric vehicle charging station based on the principle of maximizing utility [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 1-8.
- [11] 王冬, 刘继春, 曹芷健, 等. 考虑驾驶人出行链的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(6): 1-9, 52.
- WANG Dong, LIU Jichun, CAO Zhijian, et al. Planning for charging stations of electric vehicles considering drivers' trip chains [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(6): 1-9, 52.
- [12] WANG D, GUAN X H. Analysis of multi-location PEV charging behaviors based on trip chain generation [C]//2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2014: 151-156.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 褚浩然, 郑猛, 杨晓光, 等. 出行链特征指标的提出及应用研究[J]. 城市交通, 2006, 4(2): 64-67.
- ZHU Haoran, ZHENG Meng, YANG Xiaoguang, et al. A study on trip-chain indices and their application [J]. Urban Transport of China, 2006, 4(2): 64-67.
- [16] 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.
- [17] 陈连福. 电动出租车充电站布局规划研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- CHEN Lianfu. Research on the planning and layout of electric taxi charging station [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [18] 陈梦涛, 张兆君, 谭风雷, 等. 电动汽车充电站多阶段选址规划[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 117-121.
- CHEN Mengtao, ZHANG Zhaojun, TAN Fenglei, et al. Multi-stage location planning of electric vehicle charging station [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 117-121.
- [19] TAYLOR J, MAITRA A, ALEXANDER M, et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations [C]//Power & Energy Society General Meeting, 2009: 1-6.
- [20] 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. Calculation method of electric vehicle charging load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [21] 廖斌杰, 杨俊, 文福拴, 等. 电动出租车充电负荷的时空随机分布特性[J]. 电力建设, 2017, 38(1): 8-16.
- LIAO Binjie, YANG Jun, WEN Fushuan, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(1): 8-16.

#### 作者简介:



李琳玮

李琳玮(1981),男,学士,高级工程师,从事电网规划及电力系统分析工作(E-mail: cnl3804@126.com);

宁光涛(1961),男,学士,教授级高级工程师,从事电网规划及电力系统分析工作;

俞悦(1973),女,学士,高级工程师,从事电网规划及电力系统分析工作。



## Comprehensive charging demand of multi-type electric vehicles based on traffic information

LI Linwei, NING Guangtao, YU Yue, CHEN Mingfan, CHEN Yida, HE Lipeng  
(Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570203, China)

**Abstract:** In order to prevent the impact of electric vehicles' charging uncertainty on the distribution network, a joint modeling method for charging demand considering large-scale and multi-type electric vehicle access is proposed based on dynamic traffic information. This paper starts from the characteristics of electric vehicles as forms of transportation, combining the driving characteristics of different types of electric vehicles with traffic information, and establishes the corresponding operation spatio-temporal model. Considering the two modes of fast charging and slow charging, this paper studies the charging behavior of various electric vehicles, in order to construct corresponding charging demand models. Combined with the user's daily mileage, the basic operation cycle is proposed, and the Monte Carlo simulation method is used to calculate the distribution of the comprehensive charging demand of multiple types of electric vehicles under different working days. The simulation results verify the feasibility of the modeling method and show that the access of multiple types of electric vehicles will bring multiple peaks of power demand to the distribution network as a whole.

**Keywords:** traffic information; electric vehicle; charging demand; Monte Carlo simulation method

(编辑 陈静)

(上接第 169 页)

## Estimation of state of charge of energy storage lithium battery based on PSO-ELM

MIAO Jiasen<sup>1,3</sup>, CHENG Limin<sup>3</sup>, LYU Hongshui<sup>1,2</sup>

(1. NARI Group(State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. NARI School of Electrical Engineering and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Accurate estimation of lithium ion battery state of charge (SOC) is the key to ensure safe and stable operation of battery management system. The commonly used ampere-hour integral method has cumulative errors. And the Kalman filter algorithm needs to establish an accurate battery model. The neural network method does not rely on a specific lithium battery model and can reflect the nonlinear relationship of lithium batteries, and thus has received extensive attention. However, traditional neural network has long training time and low precision when estimating SOC. For the low accuracy of SOC estimation in the past, the particle swarm optimization (PSO) of extreme learning machine (ELM) neural network method is proposed. In the PSO-ELM model, voltage, current and temperature are used as input vector and the value of SOC is used as output vector. The experimental data is imported into the model for training and testing, and the input weight matrix and hidden layer threshold of ELM are optimized by PSO. In addition, the simulation results show that compared with the prediction results of BP neural network, the method of estimating SOC in this paper has higher precision.

**Keywords:** energy storage battery; state of charge estimation; particle swarm optimization algorithm; extreme learning machine

(编辑 陈静)