

# 考虑用户充电差异性的家用电动汽车 充电需求分布分析方法

张美霞, 蔡雅慧, 杨秀, 李丽

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200082)

**摘要:**针对家用电动汽车充电行为的随机性问题,在出行链理论的基础上提出一种计及停车时长充裕度以及分时电价的充电需求分布分析方法。首先,基于全美家庭出行调查数据和出行链理论,研究不同时刻出行量影响下的时空特征量;然后,根据预估的电量需求对用户进行分类,运用模糊推理分析停车时长充裕度以及分时电价对用户充电意愿的影响,构建不同用户的分层充电决策模型,得到充电需求的时空分布情况。算例结果表明,停车时长充裕度以及分时电价对用户的随机性充电行为具有引导作用,可使充电需求在时空分布中发生转移,整体分布出现降峰、避峰效应。

**关键词:**家用电动汽车;充电需求;分层决策;停车时长充裕度;分时电价

**中图分类号:**U 469.72

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202002003

## 0 引言

随着电动汽车渗透率的逐步攀升,大规模充电负荷的接入给电网的运行和调度带来了越来越多的风险和挑战。充电需求的精准建模为降低上述影响提供了理论基础<sup>[1]</sup>,近年来一直是国内外学者的研究热点;另一方面,将电动汽车考虑到综合能源服务当中,可在电网调度和充电站规划等方面发挥重要的作用<sup>[2-4]</sup>。

电动汽车充电需求的研究主要包含出行特征分析与需求建模2个阶段。对于出行特征分析而言,大多数研究从用户的行为特征入手,主要进行以起始充电时间和电池荷电状态SOC(State Of Charge)为主的充电规律研究<sup>[5-6]</sup>以及以结束行驶时间和日行驶里程为主的出行特征分析<sup>[7-8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>从充电站角度出发,运用动态交通流模型研究了电动汽车的到站率;为了进一步探究电动汽车在空间中的分布情况,部分学者提出了一种以出行链为模型的特征分析方法<sup>[10-13]</sup>,在研究时间分布特征的基础上,运用马尔可夫理论将用户的空间位置以一定的时间顺序连接起来,通过时间链和空间链对用户的出行特征进行交互分析,得到电动汽车的时空分布规律。

对于充电需求建模而言,由于各学者的研究角度不同,考虑的影响因素也各有特点。大多数学者重点关注由出行需要而产生的充电需求<sup>[10-12]</sup>。除此之外,文献<sup>[13]</sup>考虑了当荷电状态未达到用户预期

值时出现的随机性充电行为;文献<sup>[14]</sup>考虑了由于充电设施充裕性而产生的用户差异性反馈效应;文献<sup>[15]</sup>运用模糊推理法研究了停车时长和荷电状态对用户充电概率的影响,并建立了充电需求模型。

以上文献从不同的角度实现对电动汽车出行特征的分析,具有一定的借鉴价值。但在特征研究过程中大多数文献将研究焦点放在开始行驶时刻、行驶里程<sup>[11]</sup>以及停车时长<sup>[13]</sup>等特征量的独立性研究上。而实际运行中,出行量的变化会导致出现行驶时间延长或缩短的现象,从而影响到时间链中特征量的累计精度。此外,大多数研究只关注由于出行而产生的电量需求,简化了用户对充电成本、停车时长、充电站状况等多种因素对用户充电意愿的综合影响。

基于上述分析,本文首先以出行链理论为基础,运用全美家庭出行调查NHTS(National Household Travel Survey)数据研究用户的日常出行规律。同时提出出行量的概念,分析不同时刻的出行量对行驶时长分布的影响,进而借助蒙特卡洛法模拟不同类型的出行链模型。然后,根据出行电量需求进行用户分类,并运用模糊推理方法分析停车时长充裕度和分时电价影响下用户的充电行为,建立考虑用户充电差异性的分层充电决策模型。最后,借助算例对本文所提模型的充电需求变化趋势与分布情况进行验证分析。

## 1 家用电动汽车出行特征

### 1.1 出行链理论

将不同的出行目的以特定的时间顺序进行连接就构成了电动汽车的出行链,其中包含了不同类型的出行特征信息,可以很好地描述用户的出行过程,

收稿日期:2019-08-27;修回日期:2019-12-08

基金项目:上海市地方能力建设基金资助项目(16020500900);  
上海市科委项目(18DZ1203200)

Project supported by Shanghai Local Capacity Construction Fund(16020500900) and Shanghai Science and Technology Program(18DZ1203200)

同时反映了不同行程之间的连贯性<sup>[16]</sup>。

家用电动汽车的出行特征较为复杂,大多数研究是以住宅区(H)作为日常出行的始末点,并按功能区域将出行目的划分为5类,其中包含住宅区(H)、工作区(W)、商业区(C)、休闲区(R)以及涉及其他目的(例如接送他人、上学、外出就医等)的区域(O)<sup>[13]</sup>。出行链模式按停车节点数量可分为简单链和复杂链<sup>[11]</sup>,单一目的的出行模式(除始末点外停车节点为1)称为简单链,多目的的出行模式则为复杂链。

本文借助出行链理论对家用电动汽车的出行特征进行研究,分别从时间和空间2个维度分析用户的日常出行规律。出行链的时空变化分布如图1所示,横轴表示的时间链主要以开始行驶时刻、行驶时长以及停车时长组成;纵轴主要表征不同目的地之间的行驶距离。

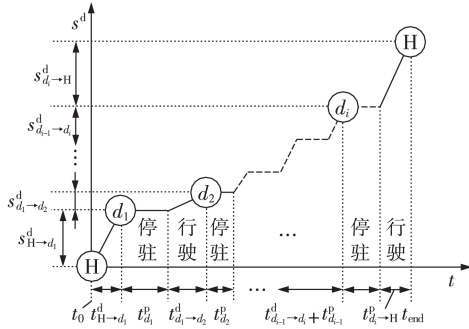


图1 出行链时空变化分布

Fig.1 Time-space variation distribution of travel chain

用于描述出行链模型的时空特征量集合  $G_{TC}$  如式(1)所示。

$$G_{TC} = \{s_i, d_i, t_0, t_{s_i \rightarrow d_i}^d, t_{d_i}^p, s_{s_i \rightarrow d_i}^d\} \quad (1)$$

$$i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}; s_i, d_i \in \{H, W, C, R, O\}$$

其中,  $i$  为出行次数;  $s_i$  为第  $i$  次出行的起点;  $d_i$  为第  $i$  次出行的终点;  $t_0$  为以住宅区为行驶起点的开始行驶时刻;  $t_{s_i \rightarrow d_i}^d$  为第  $i$  次出行(以  $s_i$  为起点,以  $d_i$  为终点)的行驶时长;  $t_{d_i}^p$  为在区域  $d_i$  处的停车时长;  $s_{s_i \rightarrow d_i}^d$  为第  $i$  次出行(以  $s_i$  为起点,以  $d_i$  为终点)的行驶距离。

本文针对开始行驶时刻、行驶里程这2个特征量,分别采用广义极值分布<sup>[12]</sup>和对数正态分布<sup>[13]</sup>进行参数拟合。由于不同区域内的停车时长分布差异较大,故采用多种概率函数进行分析:对于工作区内停车时长呈现多峰分布的情况,采用高斯混合分布进行拟合<sup>[13]</sup>;其他区域内的停车时长则统一采用广义极值分布进行拟合。此外,本文借助非齐次马尔可夫链<sup>[17]</sup>分析电动汽车空间转移与时间特征之间的耦合关系,建立不同出行时刻的空间转移矩阵。上述特征量的分析过程不再进行过多阐述,本文重点

对电动汽车出行过程中的行驶时长进行研究。

## 1.2 考虑出行量的行驶时长分布

行驶时长的分布理论上可借助实时行驶速度和行驶里程得到。然而,目前特征量集合中缺少对行驶速度的相关描述。同时,气象、路况等外界因素同样会对行驶速度产生干扰,从而影响行程中的用时情况。

本文将天气、路况等外界因素对行驶时长的影响转化为不同时刻出行量对行驶时长的影响进行分析。车辆的开始行驶时刻和结束行驶时刻的分布情况可以体现出行过程中的高峰期和低谷期,进而可计算得到各个时刻的出行量比例。图2为住宅区至工作区的出行时刻与出行量比例的分布情况,出行量的峰值时刻即为出行高峰时刻。

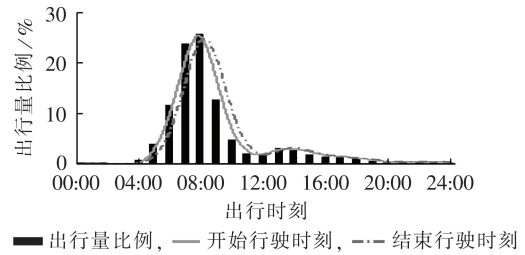


图2 出行量比例分布

Fig.2 Distribution of travel volume ratio

理论上而言,当行驶距离在一定的范围内时,出行量大的路段所需的行驶时间较长;反之,出行量小的路段所需的行驶时间相应较短。为了研究不同时刻出行量的差异对行驶时长分布产生的影响,将行驶里程进行等量划分,并对不同距离区间内的出行时间进行离散化,在不同的时间窗  $[t_i, t_i + \Delta t]$  内采用高斯分布对行驶时长进行参数拟合。

基于上述特征分析,运用蒙特卡洛法进行模拟即可得到不同出行模式下的出行链模型。然后,考虑出行过程中电动汽车的能量消耗,并对不同类型用户的充电需求进行建模。

## 2 考虑用户充电差异性的电动汽车充电需求建模

首先,对电动汽车在上一段行驶过程中的能量消耗进行计算并更新电池当前的荷电状态;然后,根据预估的电量需求确定用户类型(需求型用户、随机型用户),针对不同类型用户建立计及多种因素影响的分层充电决策模型;最后,根据决策结果进行电量补充和需求计算,通过聚合得到充电需求的时空分布。

### 2.1 考虑用户充电差异性的分层充电决策模型

用户的充电行为受用户习惯、车辆状态以及充电站情况等多种因素影响,常规用户的充电需求除

了受出行的制约以外,用户的随机性充电行为同样会使充电需求分布产生变化。本文首先根据剩余电量对出行需求的满足程度将用户分为需求型和随机型2种类型。考虑到2种类型用户的充电差异性,分别对其进行充电模式和充电决策的判定。

### 2.1.1 基于出行需求的用户分类模型

忽略外界因素对耗电量的影响,将电动汽车的能量消耗和行驶里程视为线性关系,行程中的电量消耗可通过行驶里程以及每千米平均耗电量计算得到。根据式(2)—(4)更新到达目的地 $d_i$ 时电池的剩余电量 $E_{d_i}$ (单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ )和荷电状态 $\text{SOC}_{d_i}$ 。

$$\Delta E_{s_i \rightarrow d_i} = s_{s_i \rightarrow d_i}^d e_0 \quad (2)$$

$$E_{d_i} = E_{d_{i-1}} - \Delta E_{s_i \rightarrow d_i} \quad (3)$$

$$\text{SOC}_{d_i} = (E_{d_{i-1}} - \Delta E_{s_i \rightarrow d_i}) / B_{ev} \quad (4)$$

其中, $e_0$ 为电动汽车在行驶过程中的每千米平均耗电量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h} / \text{km}$ ;  $\Delta E_{s_i \rightarrow d_i}$ 为完成当前行程的总耗电量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $B_{ev}$ 为电动汽车的电池容量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

在完成能耗计算和电池状态更新后,预先对下一段行程的电量消耗进行估计,并根据电量需求进行用户分类。若当前的剩余电量不满足下一段行程的需求,则将此用户划分为需求型用户,为了保证正常出行,该用户必须进行充电;其他用户的剩余电量相对充足,则称之为随机型用户。同时设置充电决策系数 $r$ 作为充电行为的决策数(若需要充电则将 $r$ 置1,否则将 $r$ 置0),用户分类依据如式(5)所示。

$$\text{SOC}_{d_i} - s_{s_{i+1} \rightarrow d_{i+1}}^d e_0 / B_{ev} = \text{SOC}_{d_{i+1}} \quad (5)$$

其中,若 $\text{SOC}_{d_{i+1}} \leq 20\%$ ,则将该用户分类为需求型用户,且 $r=1$ ;若 $\text{SOC}_{d_{i+1}} > 20\%$ ,则将该用户分类为随机型用户,且 $r$ 未知。

### 2.1.2 基于停车时长的需求型用户充电模式选择模型

已有文献在选取充电模式时通常有2种方法:①在不同的类型区域内采用固定的充电模式<sup>[11-12]</sup>;②根据充电需求的紧急程度确定充电模式<sup>[13]</sup>。本文考虑到停车时长对需求型用户充电模式选择的影响,当停车时长满足慢速充电所需的充电时长时,为了减小对电池寿命的影响,通常采用慢速充电;当停车时长不满足慢速充电所需的充电时长时,其成为紧急需求型用户,急需在短时间内将电量补充至预期状态,需采用快充模式。充电模式选择依据如式(6)所示。

$$P_{d_i} = \begin{cases} P_{d_i}^{sc} & t_{d_i}^p \geq t_{d_i}^{sc} \\ P_{d_i}^{fc} & t_{d_i}^p < t_{d_i}^{sc} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $P_{d_i}$ 为用户在区域 $d_i$ 中选取的充电功率; $t_{d_i}^{sc}$ 为区

域 $d_i$ 中采用慢速充电时需要的充电时长; $P_{d_i}^{sc}$ 、 $P_{d_i}^{fc}$ 分别为区域 $d_i$ 中充电站的慢充、快充功率,单位为 $\text{kW}$ 。

### 2.1.3 基于模糊推理的随机型用户充电决策模型

现有研究中有部分学者采用模糊推理方法模拟用户的判断过程<sup>[18]</sup>,但很少有学者将停车时长和分时电价同时考虑到用户随机充电行为的研究中。本文重点考虑停车时长充裕度以及分时充电电价对用户充电意愿的共同影响,建立充电决策模型。由于用户的充电心理难以进行量化分析,故借助模糊推理方法对用户的充电决策进行判断。

#### (1) 停车时长充裕度。

用户的满意程度主要取决于结束充电后的电池荷电状态 $\text{SOC}_{P_i}$ ,即 $\text{SOC}_{P_i}$ 的饱和程度越高,则用户的满意度越高。通常认为当 $\text{SOC}_{P_i} \geq 80\%$ 时,用户的满意度较高,充电概率较大;当 $\text{SOC}_{P_i} \leq 20\%$ 时,用户的充电意愿较小;当 $20\% < \text{SOC}_{P_i} < 80\%$ 时,则涉及对其他因素的考虑。

对于随机型用户而言,用户更倾向于在停车时间较为充裕的停车区域内将电量充至饱和。因此,本文首先按式(7)计算得到停车时长 $t_{d_i}^p$ 内充电可达到的最大饱和值 $\text{SOC}_{P_i}$ 。

$$\text{SOC}_{P_i} = \text{SOC}_{d_i} + P_{d_i}^{sc} \eta t_{d_i}^p / (60 B_{ev}) \quad (7)$$

其中, $\eta$ 为充电效率。然后,基于 $\text{SOC}_{P_i}$ 衡量电动汽车在该区域的停车时长充裕度 $A_{P_i}$ :若 $\text{SOC}_{P_i} \leq 20\%$ ,则停车时长充裕度 $A_{P_i}$ 为低;若 $20\% < \text{SOC}_{P_i} < 80\%$ ,则停车时长充裕度 $A_{P_i}$ 为中;若 $\text{SOC}_{P_i} \geq 80\%$ ,则停车时长充裕度 $A_{P_i}$ 为高。

#### (2) 分时充电电价。

除了停车时长充裕度外,分时电价对用户的充电意愿也有一定程度的影响。通过电价信号引导用户在非峰值时段进行充电,可实现部分峰荷的转移,降低电动汽车在峰时聚集充电对电网的稳定运行产生的不良影响。

将电价与停车时长充裕度作为输入,利用模糊推理方法建立随机型用户的充电决策模型。首先分别对2个输入进行评价,将分时电价分为谷(I级)、平(II级)、峰(III级)3个等级,将停车时长充裕度同样分为不充裕(I级)、一般充裕(II级)、充裕(III级)3个等级。按模糊集由低到高的等级顺序依次选取适合表达偏低型模糊过程的Z型函数、中间型模糊过程的双边高斯型函数和偏高型模糊过程的S型函数作为隶属度函数,不同等级情况下的隶属度函数见附录A中的式(A1)—(A3)。

根据模糊推理算法的输出结果,将用户的充电概率分为低(I级)、较低(II级)、中(III级)、较高(IV级)、高(V级)5个等级(按输入量等级的不同组合方式),并按表1制定模糊推理规则<sup>[15]</sup>。表中, $C$ 为充电

电价; $A$ 为停车时长充裕度; $p$ 为用户的充电概率。

表1 模糊推理规则

Table 1 Fuzzy inference rules

| 停车时长<br>充裕度 | 充电概率      |           |           |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
|             | $C_I$     | $C_{II}$  | $C_{III}$ |
| $A_I$       | $p_{III}$ | $p_{II}$  | $p_I$     |
| $A_{II}$    | $p_{IV}$  | $p_{III}$ | $p_{II}$  |
| $A_{III}$   | $p_V$     | $p_{IV}$  | $p_{III}$ |

运用模糊控制器实现随机型用户充电决策的推理过程,并按照模糊控制器输出的充电概率值,随机产生用户的充电决策系数 $r$ 。分层充电决策建模的整体构架如图3所示。

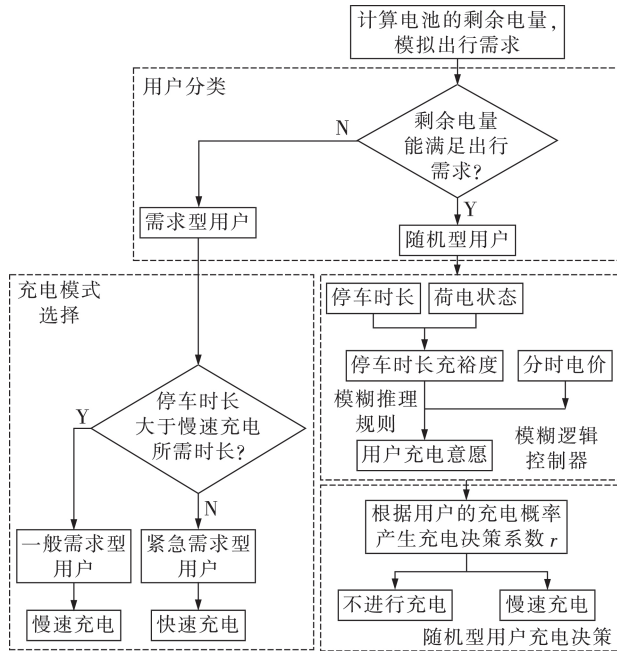


图3 分层充电决策过程

Fig.3 Decision process of layered charging

## 2.2 充电需求计算

针对不同用户的充电决策,计算其充电所需时长,并确定区域内的充电时段,最终将充电需求在相应区域的充电负荷上进行叠加,即可得到充电需求的整体时空分布。充电需求的计算流程如图4所示,具体步骤如下:

- (1)根据对全美家庭出行调查数据进行的特征分析,模拟用户在不同行程中的时空特征量;
- (2)当电动汽车停止于某一区域时,进行状态更新;
- (3)模拟用户下一段的出行,预先对用户的电量需求进行计算;
- (4)根据出行电量需求的满足程度进行用户分类,并针对不同的用户进行充电决策和充电模式的判断;
- (5)确定电动汽车充电需求在当前区域的充电时间分布,将不同区域内产生的充电需求进行叠加,

得到总体充电需求的分布情况。

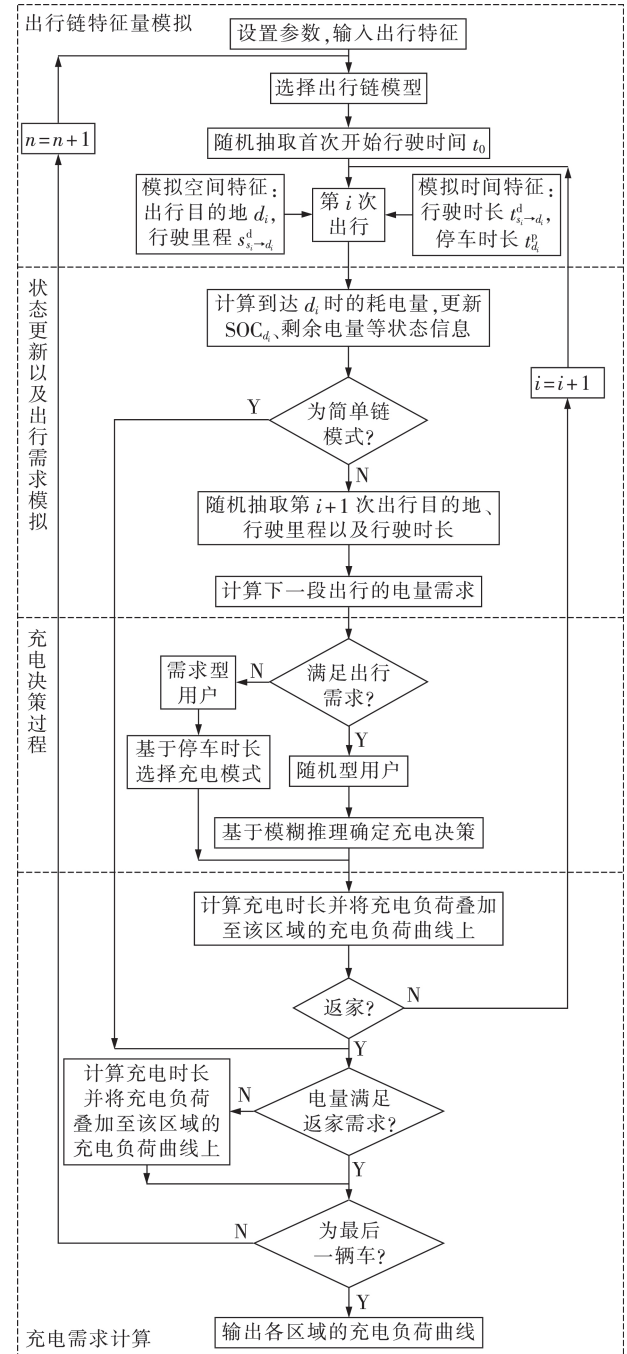


图4 充电需求计算流程图

Fig.4 Flowchart of calculating charging demand

## 3 算例分析

### 3.1 参数设置

#### 3.1.1 出行链参数设置

基于美国交通部2017年家庭出行调查数据库trippub.xlsx,提取以家用车为出行工具的750000条记录进行统计分析。数据库中用户的出行目的大致分为9类,目的类型及所占比例如表2所示。

基于数据库的统计分析可知,以回家、工作、购

表2 出行目的及所占比例

Table 2 Travel purpose and proportion

| 出行目的      | 所占比例 / % | 出行目的    | 所占比例 / % |
|-----------|----------|---------|----------|
| 回家        | 34       | 社交 / 休闲 | 9        |
| 工作        | 12       | 接送他人    | 7        |
| 学校 / 宗教活动 | 4        | 外出吃饭    | 8        |
| 医疗        | 2        | 其他      | 2        |
| 购物        | 22       |         |          |

物、外出吃饭、社交 / 休闲为目的的出行记录占总量的85%;出行频次方面,单日出行次数不高于4次的行程占出行总量的75%;同时以住宅区(H)为首次出行起点的行程占比达到81%以上。综合以上分析,本文设置以住宅区为行程的始末点,出行链中停留节点上限设置为3个,且电动汽车在住宅区(H)、工作区(W)、商业区(C)、休闲区(R)这4种区域内停留时可进行电量的补充,其他区域(O)仅供停留,不考虑充电。

### 3.1.2 充电需求分析参数设置

#### (1)假设条件。

a. 假设研究中的所有车辆型号相同,且具有相同的参数;同时忽略充电设施的充裕度问题,所有充电过程都以即到即充的方式进行。

b. 设置在简单链和复杂链以3:7比例混合的情况下进行仿真。

#### (2)算例参数设置。

电动汽车的电池容量统一设置为 $30 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,每千米平均耗电量为 $0.21 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{km}$ 。各充电区域内均设立包含2种充电模式的综合充电站,快速充电功率 $P_{d_i}^{\text{fc}} = 30 \text{ kW}$ ,慢速充电功率 $P_{d_i}^{\text{sc}} = 4 \text{ kW}$ 。同时采用上海市2018年11月制定的分时电价表(如表3所示)进行电价划分。电动汽车保有量方面,本文设置某地区家用电动汽车保有量为40 000辆。基于MATLAB进行的模拟次数设置为1 000次。

表3 分时电价

Table 3 Time-of-use electricity price

| 时段                                    | 电价 / $[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$ |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 08:00—11:00, 18:00—21:00              | 1.10                                                    |
| 06:00—08:00, 11:00—18:00, 21:00—22:00 | 0.61                                                    |
| 22:00至次日06:00                         | 0.30                                                    |

## 3.2 结果分析

### 3.2.1 基于出行量的行驶时长分布

考虑到出行量对实际行驶时长的影响,实际出行量的分布如图5所示。从图中可以看出,08:00、12:00和18:00为出行量比例较高的3个时刻。

分别以10 km和1 h作为行驶里程和出行时刻的划分间隔,在不同的行驶里程区间内对不同出行时刻的行驶时长进行拟合,拟合所得的行驶时长期望值分布如图6所示。

由图6可知,在划定的行驶区间内,行驶时长的

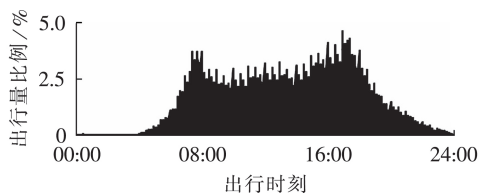
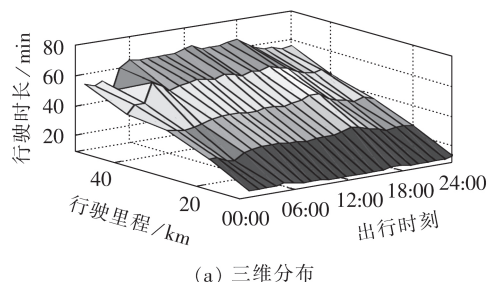
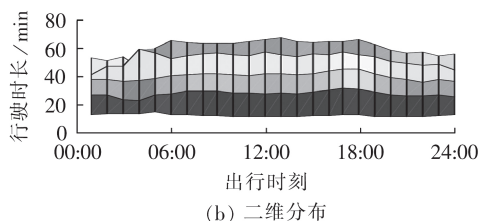


图5 不同出行时刻的出行量分布

Fig.5 Travel volume distribution at different travel times



(a) 三维分布



(b) 二维分布

图6 不同出行条件下行驶时长分布

Fig.6 Travel time distribution under different travel conditions

期望值普遍于08:00、12:00、18:00会出现增长趋势,大致与出行量的高峰时刻对应相似。说明有多种因素会对出行量产生影响,进而使行驶时长分布产生变化。在出行量较大的时刻,对应的行驶时长会受到出行量影响而有所延长。其他时间特征量的拟合参数见附录B中表B1。

### 3.2.2 充电需求分析

#### (1)基于模糊推理的随机型用户充电概率分析。

将停车时长充裕度以及分时电价信号输入模糊逻辑控制器中,得到的充电概率分布如图7所示。

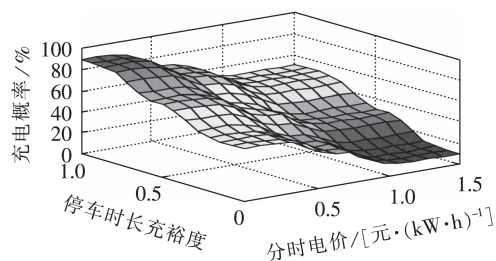


图7 基于模糊推理的充电概率分布

Fig.7 Charging probability distribution based on fuzzy inference

如果电动汽车到达目的地时正处于电价谷时段且停车时长能够将 $\text{SOC}_{\text{in}}$ 充至较饱和状态,则此时用户的充电意愿较强烈;反之,若电动汽车在某区域的停放时间较短,且正处于峰时电价时段,考虑到用户

充电成本和停车时长的敏感程度,则此时用户的充电概率相对较低。将输入信号以不同等级的组合形式输入,通过离线查询得到用户充电概率的测试值,如表4所示。

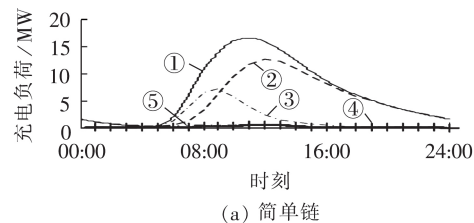
表4 输入量不同时充电概率的测试值

Table 4 Test values of charging probability with different inputs

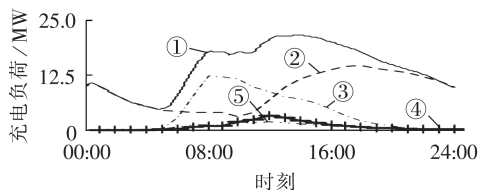
| 电价 /<br>[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ] | 停车时长<br>充裕度 | 充电结束时的<br>荷电状态 / % | 充电<br>概率 | 用户充电<br>意愿 |
|-----------------------------------|-------------|--------------------|----------|------------|
| 0.30                              | 高           | 90                 | 0.88     | 高          |
|                                   | 中           | 60                 | 0.70     | 较高         |
|                                   | 低           | 20                 | 0.55     | 中          |
| 0.61                              | 高           | 80                 | 0.69     | 较高         |
|                                   | 中           | 50                 | 0.51     | 中          |
|                                   | 低           | 20                 | 0.32     | 较低         |
| 1.10                              | 高           | 100                | 0.50     | 中          |
|                                   | 中           | 60                 | 0.35     | 较低         |
|                                   | 低           | 10                 | 0.10     | 低          |

## (2)考虑用户充电差异性的充电负荷曲线。

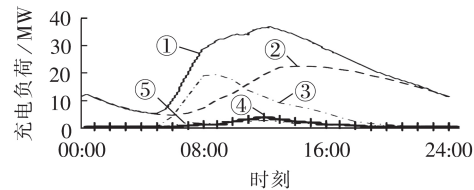
本文基于 MATLAB R2014a 平台对充电需求进行模拟,模拟时间尺度为 1 min。简单链、复杂链以及混合链出行模式下所产生的充电需求曲线如图8所示。



(a) 简单链



(b) 复杂链



(c) 混合链

① 总需求, ② 住宅区, ③ 工作区  
④ 商业区, ⑤ 休闲区

图8 不同出行链模式下的充电需求分布曲线

Fig.8 Charging demand distribution curves under different travel chain modes

不同的出行模式所产生的充电需求具有一定的差异性。简单链出行模式下产生的充电需求总量为 161.51 MW·h, 占混合链模式下充电总需求的 32.01%; 复杂链出行模式下产生的充电需求为 343

MW·h, 占比为 67.99%。简单链和复杂链所产生充电需求的统计量结果分别如附录 B 中表 B2 和表 B3 所示, 对应出行模式下产生的需求总量比例约为 3:7, 与设置的出行链类型比例相似。

从充电需求的时间分布来看, 以简单链为出行模式的需求峰值出现在 11:00, 复杂链模式下用户的需求峰值推迟至 13:00 左右, 并且复杂链出行模式下产生充电需求在空间分布方面较为分散。

混合链模式下产生的充电需求分布结果见表 5。从空间分布情况来看, 大多数用户选择在工作区和住宅区进行充电, 这 2 个区域总体的电量需求占总需求的 91.68%; 从时间分布情况上看, 不同区域的充电需求在时间划分上有明确的差异性, 工作区的充电负荷峰值出现于 08:37 而商业区和休闲区负荷峰值处于正午时段, 住宅区的充电高峰出现于 14:07, 叠加后的总需求高峰则是出现于 12:00, 根据表 3 的电价时段划分, 12:00 正处于电价平值时段。

表5 不同区域的充电需求统计量

Table 5 Charging demand statistics of different regions

| 区域    | 充电需求 /<br>(MW·h) | 占总需求<br>的比例 / % | 峰值时刻  | 负荷峰值 /<br>MW |
|-------|------------------|-----------------|-------|--------------|
| 住宅区   | 330.66           | 65.54           | 14:07 | 22.20        |
| 工作区   | 131.90           | 26.14           | 08:37 | 19.33        |
| 商业区   | 22.06            | 4.37            | 12:00 | 3.61         |
| 休闲区   | 19.88            | 3.94            | 11:56 | 2.38         |
| 总充电需求 | 504.50           | 100             | 12:24 | —            |

注: 由于各区域充电负荷峰值出现的时刻不同, 因此总充电需求的峰值并非是将各区域负荷峰值进行简单叠加得到的, 总充电需求的实际峰值为 36.3 MW。

## 3.3 不同方案下充电需求的对比分析

### 3.3.1 方案设置

为了体现不同因素对用户差异性充电的影响, 本文设置了以下 3 种不同的充电方案进行对比分析。

方案 1: 本文所提计及用户充电差异性的充电需求模型。

方案 2: 忽略用户充电的随意性, 充电需求仅产生于出行需求的基础上, 即只考虑需求型用户的充电行为。

方案 3: 在考虑需求型用户的基础上, 计及随机性充电行为, 忽略充电成本的影响, 将荷电状态饱和程度与停车时长作为决策条件。当用户到达某区域时的荷电状态不足 80% 且该用户的停车时长充裕时, 采用慢充模式进行充电; 否则, 停车结束后进入下一段行程。

### 3.3.2 结果分析

方案 2 和方案 3 的充电需求时空分布分别见附录 C 中图 C1 和图 C2。3 种不同方案下的充电总需求分布见图 9。不同方案下的充电需求特征统计见表 6。

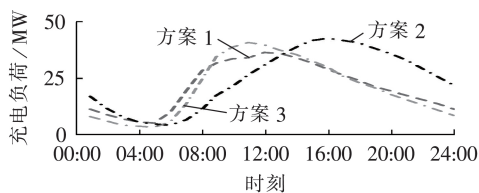


图9 不同方案下的充电需求曲线

Fig.9 Charging demand curves under different schemes

表6 不同方案下的充电需求特征统计

Table 6 Charging demand characteristic statistics under different schemes

| 方案 | 负荷峰值 / MW | 峰值时刻  | 峰谷差 / MW | 总需求 / (MW·h) | 平均充电电价 / [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ] |
|----|-----------|-------|----------|--------------|------------------------------------|
| 1  | 36.30     | 12:24 | 31.29    | 504.51       | 0.716                              |
| 2  | 42.41     | 16:09 | 38.29    | 583.51       | 0.692                              |
| 3  | 38.23     | 11:16 | 34.82    | 492.06       | 0.735                              |

由图9可知,不同方案下的充电需求有明显的差异,结合表6所示统计结果可知:

(1)在需求量方面,方案1在停车时长充裕度以及分时电价的激励作用下,充电需求峰值和峰谷差都有明显的下降,充电需求在不同区域之间的转移效果明显,方案1的需求总量比方案2降低15.7%;

(2)在时间分布方面,在分时电价的影响下,方案1产生的峰值时刻较方案3推迟了1 h,处于电价的非峰值时段;

(3)在充电成本方面,相较于方案3,方案1的平均充电电价降低了0.019元/(kW·h),说明分时电价对用户的充电意愿是有影响的。

#### 4 结论

本文结合出行链理论和全美家庭出行调查数据对家用电动汽车的时空特征进行了详细的研究,同时考虑到用户充电差异性进行家用电动汽车充电需求的建模,所得结论如下。

(1)在出行特征方面,考虑到出行量的影响,对不同出行时刻的行驶时长进行分析,验证得到出行高峰时期的确会延长行驶时长的结论。

(2)综合考虑停车时长充裕度与分时电价的影响时,充电需求峰值出现由峰时段向非峰时段转移的现象。

(3)将本文所提方案和其他2种方案进行对比,说明分时电价对随机型用户的充电行为具有一定的引导作用;在考虑电价信号以及停车充裕度的共同影响下,本文所提模型具有避峰、降峰和提高充电经济性的效应。

电动汽车充电需求的分析与建模是充电站规划、电动汽车优化调度等研究的前提,同时也是开展电网与电动汽车互动研究的基础。现有研究中缺少针对电动汽车实际运行数据的分析,而基于燃油车

出行数据的研究未必能够真实反映家用电动汽车的实际运行情况,未来亟需运用电动汽车的实际运行数据对充电需求进行精准建模及预测。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 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] SHAFIEE S, FOTUHI-FIRUZABAD M, RASTEGAR M. Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1351-1360.
- [3] DHARMAKEERTHI C H, MITHULANANTHAN N, SAHA T K. Overview of the impacts of plug-in electric vehicles on the power grid[C]//2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Perth, WA, Australia: IEEE, 2011: 1-8.
- [4] 郭建龙,文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9, 30.  
GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9, 30.
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] QIAN K J, ZHOU C K, ALLAN M, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 802-810.
- [9] BAE S, KWASINSKI A. Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 394-403.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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] TAO S, WEN J F, XIAO X N, et al. Charging demand for electric vehicle based on stochastic analysis of trip chain[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2016,10(11):2689-2698.
- [14] 刘洪,张旭,刘畅,等. 考虑充电设施充裕性的电动私家车出行与充电需求时序交互分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(18):5469-5478.
- LIU Hong, ZHANG Xu, LIU Chang, et al. Timing interactive analysis of electric private vehicle traveling and charging demand considering the sufficiency of charging facilities[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(18):5469-5478.
- [15] 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.
- [16] 贾佃精. 基于出行链的公共交通出行需求预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- JIA Dianjing. Forecast of travel demand for public transportation based on trip-chain[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2015.
- [17] IVERSEN E B, MOLLER J K, MORALES J M, et al. Inhomogeneous Markov models for describing driving patterns[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(2):581-588.
- [18] 陈丽丹,张尧, Antonio Figueiredo. 电动汽车充放电负荷预测研究综述[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):177-191.
- CHEN Lidan, ZHANG Yao, ANTONIO Figueiredo. Overview of charging and discharging load forecasting for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(10):177-191.

#### 作者简介:



张美霞

张美霞(1979—),女,江苏东台人,副教授,主要研究方向为分布式发电协调控制、电力需求侧管理(**E-mail**:zmx19790612@sina.com);

蔡雅慧(1993—),女,青海西宁人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充电特征及影响(**E-mail**:CYH\_SUEP\_system@163.com);

杨秀(1972—),男,江苏江都人,教授,博士,主要研究方向为HVDC与FACTS的运行与控制、分布式发电与微网(**E-mail**:yangxiu721102@126.com)。

(编辑 陆丹)

## Charging demand distribution analysis method of household electric vehicles considering users' charging difference

ZHANG Meixia, CAI Yahui, YANG Xiu, LI Li

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

**Abstract:** Aiming at the randomness problem of household electric vehicles' charging behavior, based on the trip chain theory, a charging demand distribution analysis method is proposed, which considers the parking time adequacy and time-of-use electricity price. Firstly, based on the NHTS (National Household Travel Survey) dataset and trip chain theory, the spatial and temporal characteristic quantities under the influence of travel volume at different times are studied. Then, users are classified according to the estimated electricity demand, and the influence of parking time adequacy and time-of-use electricity price on users' charging intention is analyzed by using the fuzzy reasoning. The hierarchical charging decision models are established for different users and then the spatial and temporal distribution of charging demand is obtained. The example results show that the parking time adequacy and time-of-use electricity price have a guiding effect on users' random charging behavior, so that the charging demand is shifted and the overall distribution has effects of peak drop and peak delay.

**Key words:** household electric vehicles; charging demand; hierarchical decision making; parking time adequacy; time-of-use electricity price

## 附录 A

在模糊控制器中，3 种模糊集（I 级、II 级、III 级）下的隶属度函数如下。

I 级模糊集下的隶属度函数为：

$$f_z(x; z_1, z_2) = \begin{cases} 1 & x \leq z_1 \\ 1 - 2 \left( \frac{x - z_1}{z_2 - z_1} \right)^2 & z_1 \leq x \leq \frac{z_1 + z_2}{2} \\ 2 \left( \frac{x - z_1}{z_2 - z_1} \right)^2 & \frac{z_1 + z_2}{2} \leq x \leq z_2 \\ 0 & x \geq z_2 \end{cases} \quad (\text{A1})$$

II 级模糊集下的隶属度函数为：

$$f_{g2}(x; \mu, \sigma) = \exp \left[ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (\text{A2})$$

III 级模糊集下的隶属度函数为：

$$f_s(x; s_1, s_2) = \begin{cases} 0 & x \leq s_1 \\ 2 \left( \frac{x - s_1}{s_2 - s_1} \right)^2 & s_1 \leq x \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x - s_1}{s_2 - s_1} \right)^2 & \frac{s_1 + s_2}{2} \leq x \leq s_2 \\ 1 & x \geq s_2 \end{cases} \quad (\text{A3})$$

其中， $z_1$ 、 $z_2$  为 Z 型函数中的相关参数； $\mu$ 、 $\sigma$  为双边高斯型函数中的参数（包含 2 组）； $s_1$ 、 $s_2$  分别为 S 型函数中的相关参数。

## 附录 B

表 B1 不同类型特征量的参数拟合结果  
Table B1 Parameter fitting result of different feature quantity

| 特征量    | 运行条件                                  | 服从的分布  | 拟合参数                                                                                                                                                                                                                      |
|--------|---------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 开始行驶时刻 | 以 H 为起点出发                             | 广义极值分布 | $k = 0.062$ , $\delta = 119.975$ , $\mu = 461.811$                                                                                                                                                                        |
| 行驶里程   | 以 {H, W, C, R, O} 为始末点的<br>25 种不同行程组合 | 对数正态分布 | $\mu = \begin{bmatrix} 1.45 & 2.03 & 1.18 & 1.42 & 1.32 \\ 2.01 & 1.61 & 1.20 & 1.61 & 1.66 \\ 1.24 & 1.09 & 0.56 & 1.32 & 1.14 \\ 1.59 & 1.44 & 1.27 & 1.50 & 1.55 \\ 1.25 & 1.61 & 0.93 & 1.36 & 1.16 \end{bmatrix}$    |
|        |                                       |        | $\sigma = \begin{bmatrix} 1.43 & 1.09 & 1.10 & 1.18 & 1.16 \\ 1.12 & 1.31 & 1.23 & 1.14 & 1.17 \\ 1.08 & 1.28 & 1.35 & 1.31 & 1.27 \\ 1.29 & 1.30 & 1.27 & 1.36 & 1.26 \\ 1.15 & 1.20 & 1.24 & 1.23 & 1.22 \end{bmatrix}$ |
| 停车时长   | H 区域                                  | 广义极值分布 | $k = 0.514$ , $\delta = 61.97$ , $\mu = 62.32$<br>$a_1 = 0.038, b_1 = 623.3, c_1 = 86.54$ ;                                                                                                                               |
|        | W 区域                                  | 高斯混合分布 | $a_2 = 0.081, b_2 = -175.9, c_2 = 206.2$ ;<br>$a_3 = 0.022, b_3 = 289, c_3 = 140.7$                                                                                                                                       |
|        | C 区域                                  | 广义极值分布 | $k = 0.578$ , $\delta = 13.55$ , $\mu = 14.44$                                                                                                                                                                            |
|        | R 区域                                  | 广义极值分布 | $k = 0.26$ , $\delta = 52.17$ , $\mu = 66.01$                                                                                                                                                                             |
|        | O 区域                                  | 广义极值分布 | $k = 1.77$ , $\delta = 15.77$ , $\mu = 9.06$                                                                                                                                                                              |

表 B2 简单链模式下的充电需求统计量结果  
Table B2 Charging demand statistics results under simple chain mode

| 区域  | 充电需求/<br>(MW·h) | 占总需求<br>的比例/% | 峰值时刻  | 负荷峰值/MW |
|-----|-----------------|---------------|-------|---------|
| 住宅区 | 119.31          | 73.87         | 12:05 | 12.48   |
| 工作区 | 35.00           | 21.67         | 08:41 | 7.12    |
| 商业区 | 2.97            | 1.84          | 11:48 | 0.51    |
| 休闲区 | 4.23            | 2.62          | 11:17 | 0.52    |
| 总计  | 161.51          | 100           | 11:18 | 16.37   |

表 B3 复杂链模式下的充电需求统计量结果  
Table B3 Charging demand statistics results under complex chain mode

| 区域  | 充电需求/<br>(MW·h) | 占总需求<br>的比例/% | 峰值时刻  | 负荷峰值/MW |
|-----|-----------------|---------------|-------|---------|
| 住宅区 | 211.36          | 61.62         | 17:47 | 14.53   |
| 工作区 | 96.90           | 28.25         | 08:28 | 12.27   |
| 商业区 | 19.09           | 5.57          | 11:58 | 3.12    |
| 休闲区 | 15.65           | 4.56          | 11:56 | 1.88    |
| 总计  | 343.00          | 100           | 14:00 | 21.37   |

附录 C

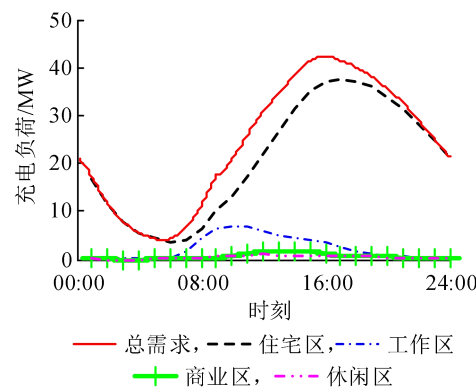


图 C1 方案 2 下不同区域的充电负荷曲线  
Fig.C1 Charging load curves of different areas under Scenario 2

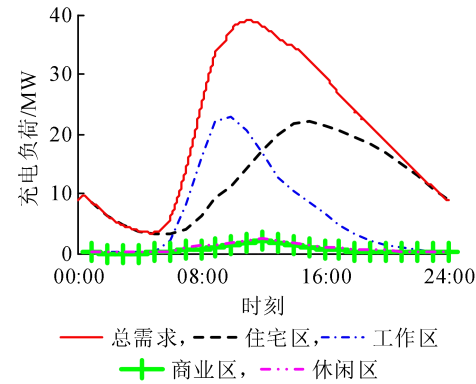


图 C2 方案 3 下不同区域的充电负荷曲线  
Fig.C2 Charging load curves of different areas under Scenario 3

由图 C1 可看出，方案 2 产生充电总需求的峰谷差明显，大多数充电需求产生于住宅区；从充电需求的变化趋势来看，需求峰值出现于 16:00 左右，且在 05:00 需求处于低谷阶段。此类用户通过夜间于住宅区补充的电量支撑其日常出行的电量需求。

由图 C2 可看出，方案 3 产生的充电需求比例在各区域间发生了明显的变化，总体充电需求的峰值也发生了前移，说明考虑用户充电随意性时，部分用户选择在工作区或停留时间较长的其他区域进行充电，转移了住宅区的一部分充电需求。