

考虑移动特性的电动汽车最优分时充电定价策略

陈中^{1,2}, 刘艺^{1,2}, 周涛^{1,2}, 邢强^{1,2}, 杜璞良^{1,2}

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省智能电网技术与装备重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:随着电动汽车产业的规模化发展,制定合理的价格机制对于引导电动汽车有序充电具有重要的意义。电动汽车负荷区别于常规负荷的最大特点是其具有移动性,基于停车生成率理论,建立考虑随机性的电动汽车移动性模型。针对电动汽车用户的特点,建立了考虑电池荷电状态的电动汽车需求价格弹性模型,以统筹电网和车主双方利益为目标,提出了基于移动特性的电动汽车最优分时充电电价定价策略。算例仿真结果表明,基于所提模型和策略求解得到的最优分时充电电价能够起到平滑负荷曲线、降低车主费用的作用。

关键词:电动汽车;移动特性;分时充电电价;需求弹性

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003005

0 引言

新能源汽车因具有清洁、环保的突出优势受到了社会各界的广泛关注^[1-2]。截至2018年9月,我国新能源汽车保有量达到了221万辆,其中纯电动汽车有178万辆,占总量的80.53%^[3]。大规模电动汽车(EV)负荷的接入势必会改变电网现有的负荷水平,特别是电动汽车的无序充电行为可能会增加负荷的波动性,拉大峰谷差,不利于电网的安全运行^[4],因此需采取一定的激励措施引导电动汽车有序充电。目前国内外在利用电价调控电动汽车充电行为方面已经取得了较多的成果^[5-8],研究主要集中在电动汽车充电需求对电价的响应、电价对电动汽车充放电行为的影响及分时(TOU)电价的定价策略等方面。文献[6-7]基于离散吸引力模型,建立了用户对电价的需求响应模型^[6],并针对电动汽车用户提出了一套最优分时电价的计算方法^[7];文献[8]提出利用区域峰谷分时电价来引导电动汽车的充电行为,城市的不同区域实行差异化电价,有效地降低了用户的充电成本、系统日峰谷差;文献[9]详细阐述了吸引力市场份额理论,给出了模型的建立、求解方法,为解决需求价格响应问题提出了一种解决思路。

电动汽车负荷区别于常规负荷的最大特点就是其具有移动性。针对电动汽车移动性的研究,传统的方法是应用起讫点(OD)矩阵方法^[10-12],严格追踪每辆车在任意时刻的OD,得到车辆的行车轨迹。利用OD矩阵记录车辆的移动性,精确度高,但当车辆和路网的规模扩大后,OD矩阵的维度将急剧增长,

难以适应大规模应用。因此在研究电动汽车的移动性时,考虑到其充放电行为受到地理位置的限制,可以将控制对象转化为某一区域的电动汽车群体。文献[13]考虑电动汽车入网的随机性,间接反映电动汽车的移动特性对控制策略的影响。文献[14]提出一种利用停车生成率模型预测电动汽车充电负荷的方法,该方法能够方便、有效地预测得到电动汽车充电负荷的时空分布特性。电动汽车负荷具有规律性和随机性双重特性,由停车生成率表征的停车特性是电动汽车运行规律性的体现,本文在文献[14]研究思路的基础上,考虑车辆运行的随机性,建立了计及随机性的电动汽车移动特性模型。

本文基于移动特性研究电动汽车的最优分时充电电价。首先,基于停车生成率理论,建立考虑随机性的电动汽车移动特性模型,模型能体现电动汽车负荷的规律性、随机性;其次,考虑到电价、里程焦虑是主导电动汽车车主充电选择的重要因素,在传统需求价格弹性模型的基础上,以充电概率表征电动汽车的充电需求,建立考虑荷电状态(SOC)的电动汽车充电需求价格响应模型;然后,以统筹电网、电动汽车用户双方的利益为目标,提出电动汽车最优分时充电电价定价策略;最后,通过算例进行仿真验证。

1 计及随机性的电动汽车移动性模型

1.1 基于停车生成率的电动汽车移动性建模

电动汽车作为一种入网的新型可控负荷^[15],相当于具有移动特性的分布式储能装置。对电动汽车移动特性展开研究,建立能准确刻画电动汽车移动特性的模型,对电动汽车的有序控制具有重要的意义。

本文基于停车生成率理论对电动汽车的移动特性展开建模。单位土地利用指标所需的停车泊位需求就是停车生成率^[16],其大小受到社会、经济、交通等众多因素的影响,表达式为:

$$P_a = f_a R_a L_a \quad (1)$$

其中, P_a 为区域 a 的停车泊位需求; R_a 为区域 a 的停

收稿日期:2019-07-03;修回日期:2020-01-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2016YFB0101-800);国家电网公司总部科技项目(SGTYHT/17-JS-201)

Project supported by the National Basic Research Program of China(2016YFB0101800) and the Science and Technology Project of SGCC(SGTYHT/17-JS-201)

车生成率; L_a 为区域 a 的建筑用地面积; f_a 为与区域 a 所属城市区位、经济状况、人口密度、交通出行量有关的停车生成率修正系数。

电动汽车移动性示意图见图1。电动汽车移动性建模的整体思路为:以网格化区域为单位描述电动汽车的移动行为,基于历史统计数据得到区域停车生成率曲线,然后得到各时段停放的电动汽车数量(模型中假设所有车辆为电动汽车,若需要考虑燃油车,可以基于交通统计数据,以一定的比例考虑电动汽车)。在各时段开始时,根据区域当前的停车数量与停车生成率模型计算所得停车数量之间的差值动态地调整电动汽车的停放、行驶状态。当区域的停车生成率较高时,则会有大量的车停放于该区域;当停车生成率较低时,则会有大量的车驶离该区域。所以车辆在具有不同停车率的区域间移动,如果区域的停车生成率曲线符合该区域用户的出行规律,那么电动汽车群体所呈现的移动特性具有合理性。

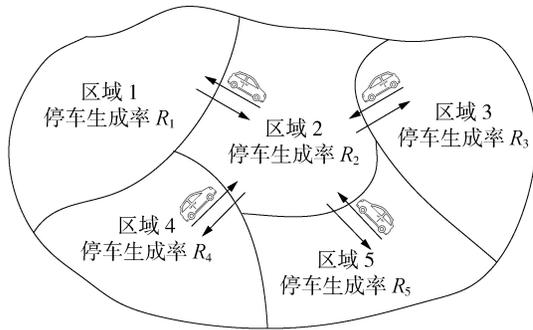


图1 电动汽车移动性示意图

Fig.1 Schematic diagram of EVs' mobility

在每一个状态更新时刻,计算由停车生成率模型计算所得区域停车需求与当前区域内实际停放的电动汽车数量之间的差值 Δn_p 。若 $\Delta n_p > 0$,则随机抽取行驶中的车辆停放至该区域;若 $\Delta n_p < 0$,则随机抽取停放在该区域且该时段没有充电的车辆驶离。

1.2 计及随机性的停车生成率模型

停车需求具有一定程度的可控性和难以约束的随机性^[16],一方面,停车需求本质上来源于社会经济活动,具有一定的规律性,可以加以观测和控制;另一方面,车辆的出行和停放行为是开放的、随机的,必然会给停车需求预测带来误差。区域的停车生成率曲线一般是基于长期的交通统计数据得到的,代表的是该区域一段时间内的停车需求整体水平,因此,当基于停车生成率曲线对电动汽车的移动行为进行建模时,需要考虑由车辆运行随机性给停车生成率曲线预测带来的随机误差。

本文采用机会约束规划方法优化区域停车生成率曲线,在考虑停车需求随机性的基础上,确保在一定的置信度水平下,区域停车生成率曲线符合长期统计数据所得停车需求水平。机会约束表达式为:

$$p_r \left(\left| (R' + \Delta R - R)/R' \right| \leq \delta \right) \geq \alpha \quad (2)$$

其中, $p_r(\cdot)$ 为随机事件 (\cdot) 发生的概率; R' 为基于统计数据得到的停车生成率预测值; R 为停车生成率实际值,为决策变量; ΔR 为停车生成率的预测误差; δ 为相对误差的允许范围,一般取15%; α 为设定的置信水平,本文取80%。

式(2)是一个不确定约束模型,通过将其转化为确定性约束模型进行求解,本文采用基于蒙特卡洛模拟(MCS)技术的求解方法对式(2)进行转换。基于MCS技术求解机会约束模型的原理是将随机事件的概率特性与数学分析相结合,通过进行大量的随机试验得到事件中对应的概率和数学期望^[17]。

结合标准粒子群优化(PSO)算法对停车生成率曲线的随机约束模型进行求解,步骤如下。

(1)设定随机变量 ΔR 合理的概率模型。考虑到自然界、人类社会和工程应用中的绝大多数噪声均服从正态分布^[18],本文假设 ΔR 服从正态分布。

(2)生成 N 组随机变量 ΔR 的值,预测值 R' 来源于文献[16],具体数据见附录A中图A1。

(3)将 R' 、 ΔR 代入式(2),进行 N 次模拟试验。

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I \left(\left| (R' + \Delta R_n - R)/R' \right| \leq \delta \right) \geq \alpha \quad (3)$$

其中, ΔR_n 为第 n 次模拟试验的停车生成率预测误差; $I(\cdot)$ 为指示函数,当事件 (\cdot) 成立时, $I(\cdot) = 1$,当事件 (\cdot) 不成立时, $I(\cdot) = 0$ 。

(4)以决策变量 R 为粒子元素,以式(3)为约束条件,利用PSO算法对 R 值进行寻优。

1.3 电动汽车状态模型

用 $S_{veh} = \{F_{area}, s_{soc}, Q, \bar{v}, F_c, W_{100}\}$ 描述电动汽车状态。

(1) F_{area} 为电动汽车的状态标志。任意时刻电动汽车的状态分为行驶、停放2种,而停放状态又可以具体划分为停放在某一区域,将 F_{area} 记为:

$$F_{area}(n) = \begin{cases} a & \text{电动汽车停放在区域 } a \\ 0 & \text{电动汽车处于行驶状态} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $F_{area}(n)$ 为第 n 辆电动汽车的区域状态; a 为电动汽车停放的区域编号。

(2) s_{soc} 为电动汽车电池的SOC,其定义为:

$$s_{soc} = Q_c/Q \quad (5)$$

其中, Q_c 为蓄电池的剩余容量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; Q 为蓄电池容量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

(3) \bar{v} 为电动汽车平均行驶速度,单位为 km/h 。

(4) F_c 为电动汽车的充电标志,充电时其值为1,不充电时其值为0。

(5) W_{100} 为电动汽车每行驶100 km的耗电量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。由 W_{100} 可以推导得到电动汽车在行驶状态下SOC的平均降低速率 v_{soc} ,单位为 h^{-1} 。

电动汽车行驶 d km的耗电量 W_d 为:

$$W_d = dW_{100}/100 \quad (6)$$

相应的电动汽车SOC下降量为:

$$\Delta s_{\text{SOC}} = W_d/Q = dW_{100}/(100Q) \quad (7)$$

则电动汽车SOC的平均下降速率 v_{SOC} 为:

$$v_{\text{SOC}} = \frac{\Delta s_{\text{SOC}}}{\Delta t} = \frac{d}{\Delta t} \frac{W_{100}}{100Q} = \bar{v} \frac{W_{100}}{100Q} \quad (8)$$

进而可以得到时段 t 第 n 辆电动汽车SOC $s_{\text{SOC}}(t, n)$ 的计算公式为:

$$s_{\text{SOC}}(t, n) = s_{\text{SOC}}(t - \Delta t, n) - v_{\text{SOC}}(n)\Delta t \quad (9)$$

其中, Δt 为状态更新的时间间隔。

式(9)用于计算行驶状态下电动汽车SOC,在停放状态下,电动汽车参与电网互动,SOC计算公式为:

$$s_{\text{SOC}}(t, n) = s_{\text{SOC}}(t - \Delta t, n) + P(t, n)\Delta t/Q \quad (10)$$

其中, $P(t, n)$ 为时段 t 第 n 辆电动汽车的充电功率,单位为kW。

2 考虑SOC的电动汽车充电需求价格弹性模型

电价是调控电动汽车有序充电的重要手段,分析电动汽车充电行为对电价的响应是制定合理价格机制的关键。本文基于吸引力模型,考虑影响电动汽车车主充电选择的2个重要因素——电价、里程焦虑,建立考虑SOC的电动汽车对电价的响应模型。

2.1 吸引力模型

吸引力模型在理论上认为一个商品所占据的市场份额比例取决于其对消费者的吸引力^[9],吸引力越大,则商品所占据的市场份额越高。该模型是经济学领域被广泛接受和应用的一种市场份额模型。依据吸引力模型,一个商品的市场份额可以表示为:

$$S'_i = A'_i/A' \quad (11)$$

$$A' = \sum_{i=1}^m A'_i \quad (12)$$

其中, S'_i 为商品 i 在时段 t 的市场份额; A'_i 为商品 i 在时段 t 的吸引力; A' 为包含商品 i 在内的同类商品在时段 t 的总吸引力; m 为同类商品总数。

本文的研究重点之一是电价,使用乘法竞争互动(MCI)模型较为合理^[9],由MCI模型得到吸引力的表达式为:

$$A_i = e^{\alpha_i} \prod_{k=1}^K (X_i^k)^{\beta_k} \varphi_i \quad (13)$$

其中, α_i 为商品 i 对吸引力的固定影响因素; X_i^k 为影响商品 i 市场份额的第 k 个自变量; K 为自变量数; β_k 为 X_i^k 对吸引力的影响系数; φ_i 为商品 i 的误差项。

将式(13)代入式(11)和式(12),得到MCI市场份额模型为:

$$S'_i = e^{\alpha_i} \prod_{k=1}^K (X_i^k)^{\beta_k} \varphi_i / \left[\sum_{j=1}^m e^{\alpha_j} \prod_{k=1}^K (X_j^k)^{\beta_k} \varphi_j \right] \quad (14)$$

2.2 需求弹性

在经济学中,需求弹性是指需求变动幅度与自变量变动幅度之比的绝对值^[19],在MCI市场份额模型中,需求弹性的计算公式为:

$$\varepsilon_{ii}^k = (\partial S'_i / S'_i) / (\partial X_i^k / X_i^k) \quad (15)$$

$$\varepsilon_{ij}^k = (\partial S'_i / S'_i) / (\partial X_j^k / X_j^k) \quad (16)$$

其中, ε_{ii}^k 为商品 i 的市场份额对自变量 X_i^k 的自弹性系数; ε_{ij}^k 为商品 i 的市场份额对商品 j 的自变量 X_j^k 的互弹性系数。

将式(14)代入式(15)和式(16),推导得到弹性系数的一般计算公式为:

$$\varepsilon_{ii}^k = \beta_k (1 - S'_i) \quad (17)$$

$$\varepsilon_{ij}^k = -\beta_k S'_j \quad (18)$$

2.3 考虑SOC的电动汽车充电需求价格弹性模型

本文研究的是电动汽车充电行为对电价的响应,结合吸引力模型理论,将每一个时段的充电需求视为一种商品,一般划分峰、平、谷3个电价时段,将充电需求对电价的响应转化为充电需求的吸引力对电价的响应。从用户的角度出发,假设影响电动汽车车主充电决策的重要因素包括电价和车辆的SOC,即电价和SOC是影响充电需求的2个自变量,将其代入式(13)和式(14),得到针对电动汽车充电需求的市场份额模型,见式(19)和式(20)。

$$A_i^{\text{EV}} = e^{\alpha_i} p_i^{\beta_1} s_{\text{SOC}i}^{\beta_2} \varphi_i \quad (19)$$

$$S_i^{\text{EV}} = e^{\alpha_i} p_i^{\beta_1} s_{\text{SOC}i}^{\beta_2} \varphi_i / \left(\sum_{j=1}^m e^{\alpha_j} p_j^{\beta_1} s_{\text{SOC}j}^{\beta_2} \varphi_j \right) \quad (20)$$

其中, A_i^{EV} 为时段 i 电动汽车充电需求吸引力; S_i^{EV} 为时段 i 电动汽车充电需求的份额; p_i 为时段 i 的电价; $s_{\text{SOC}i}$ 为时段 i 电动汽车的平均SOC水平; β_1 、 β_2 分别为电价、SOC对吸引力的影响系数。

考虑到影响车主充电决断的因素为各时段的充电电价、车辆当前的SOC,因此,在模型中考虑充电需求对电价的自弹性、互弹性及充电需求对SOC的自弹性。根据需求弹性的定义及式(15)~(18),得到考虑SOC的电动汽车充电需求对电价的响应模型,如式(21)所示。模型的推导过程见附录B中式(B1)。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial q_1}{q_1} \\ \frac{\partial q_2}{q_2} \\ \frac{\partial q_3}{q_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1(1-S_1) & -\beta_1 S_2 & -\beta_1 S_3 \\ -\beta_1 S_1 & \beta_2(1-S_2) & -\beta_1 S_3 \\ -\beta_1 S_1 & -\beta_1 S_2 & \beta_3(1-S_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{p_1} \\ \frac{\partial p_2}{p_2} \\ \frac{\partial p_3}{p_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_2(1-S_1) & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2(1-S_2) & 0 \\ 0 & 0 & \beta_2(1-S_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial s_{\text{SOC}1}/s_{\text{SOC}1}}{\partial s_{\text{SOC}2}/s_{\text{SOC}2}} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC}2}/s_{\text{SOC}2}}{\partial s_{\text{SOC}3}/s_{\text{SOC}3}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中,下标1、2、3分别表示峰、平、谷电价划分时段; ∂q_i 、 ∂p_i 、 $\partial s_{\text{SOC}i}$ ($i=1, 2, 3$)分别为时段*i*电动汽车充电需求变化量、电价变化量和SOC平均水平变化量。

2.4 弹性系数计算

本文的研究重点之一是在给定的电动汽车充电需求、电价、SOC数据的前提下估算弹性系数矩阵。式(20)是一个复杂的非线性模型,直接估计的难度较大且准确度不高,可通过模型转换将其转化为易于估计的线性模型,步骤如下:①将式(20)等号两边分别取自然对数,得到取对数后的各时段充电需求的市场份额方程;②将取对数后的各方程等号两边分别相加并取平均数;③将步骤①中的结果减去步骤②中的结果,可得到线性化的方程,如式(22)所示。

$$\ln \frac{S_i}{\bar{S}} = \alpha_i^* + \beta_1 \ln \frac{p_i}{\bar{p}} + \beta_2 \ln \frac{s_{\text{SOC}i}}{\bar{s}_{\text{SOC}}} + \ln \frac{\varphi_i}{\bar{\varphi}} \quad (22)$$

其中, \bar{S} 、 \bar{p} 、 \bar{s}_{SOC} 、 $\bar{\varphi}$ 分别为 S_i 、 p_i 、 $s_{\text{SOC}i}$ 、 φ_i 的几何平均数; $\alpha_i^* = \alpha_i - \bar{\alpha}$, $\bar{\alpha}$ 为 α_i 的算术平均数。

通过运算转换,将复杂的非线性模型式(20)转换为线性模型式(22),通过线性回归方法可直接对式(22)进行 α_i 、 β_i 的估计,从而得到弹性系数矩阵。

3 最优分时充电电价定价策略

3.1 定价策略

虽然电力需求价格弹性可在一定的程度上反映电力用户对电价的响应,但用户的响应行为还受其他诸多因素的影响,特别是电动汽车用户,由于车辆的移动具有随机性,其充电行为受到地理位置、车辆状态等多方面因素的影响。基于此,本文提出了考虑电动汽车移动特性的最优分时电价定价策略,将电动汽车的移动特性考虑到电价响应的研究中。

对于常规用电负荷而言,电量是主要属性,但对于电动汽车负荷而言,影响充电负荷的主要因素有电池容量、充电功率、开始充电时间。一般地,相同规格的车辆具有相同的电池容量;在停车场模式下,大多车辆采用常规慢充方式,充电功率差别不大。因此,对于电动汽车负荷而言,车辆开始充电时间是较为重要的属性。基于电动汽车负荷的特殊性,本文采用车辆在不同时段的充电概率来表征不同时段电动汽车的充电需求,某时段车辆的充电概率越高,车主做出充电选择的概率越高,相应的充电需求越大。

考虑移动特性的电动汽车最优分时充电电价定价策略的思路为:优化粒子为电动汽车分时充电电价,由电动汽车的移动模型确立各时段电动汽车的移动状态,针对各区域停放的电动汽车,由需求弹性模型计算得到每辆车的充电概率,并进行是否充电决策。累加区域内充电车辆的充电功率得到该时段区域的充电总负荷,结合分时充电电价得到该时段的充电总费用。策略流程图见附录C中图C1,采用

PSO算法对策略进行优化求解。

3.2 目标函数

本文所提电动汽车最优分时充电电价定价策略以统筹电网、电动汽车用户双方的利益为目标,电网侧以区域的日负荷曲线波动性最小为优化目标,用户侧以电动汽车用户日充电费用最少为优化目标。

(1)区域的日用电负荷波动性最小。目标函数为:

$$\min f_1 = \min \sqrt{\frac{\sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} (P_{\text{load},t} + P_{\text{cha},t} - P_{\text{ave}})^2}{t_{\text{end}} - t_0 + 1}} \quad (23)$$

$$P_{\text{ave}} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} (P_{\text{load},t} + P_{\text{cha},t})}{t_{\text{end}} - t_0 + 1} \quad (24)$$

其中, f_1 为区域的日用电负荷波动性; t_0 为仿真开始时段; t_{end} 为仿真结束时段; $P_{\text{load},t}$ 为时段*t*除电动汽车充电负荷以外的常规负荷; $P_{\text{cha},t}$ 为时段*t*电动汽车充电负荷; P_{ave} 为区域内用电负荷均值。

(2)电动汽车用户的日充电总费用最小。目标函数为:

$$\min f_2 = \min \sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} \sum_{n=1}^{N_v} p_{\text{rice}}(t, n) P(t, n) \quad (25)$$

其中, f_2 为电动汽车用户的日充电总费用; N_v 为时段*t*电动汽车的总数量; $p_{\text{rice}}(t, n)$ 为时段*t*第*n*辆电动汽车的充电价格。

式(23)~(25)是一个多目标优化问题,在对目标函数进行求解前,为了保持量纲一致,需要对目标函数值进行标么化处理,处理方式如式(26)所示。

$$\bar{f} = (f - f_0)/f_0 \quad (26)$$

其中, \bar{f} 为标么化后的值; f 为变量原值; f_0 为基准值。

进行处理后,策略的总目标函数可以表示为:

$$f = \alpha \bar{f}_1 + \beta \bar{f}_2 \quad (27)$$

其中, α 、 β 为目标函数的权重值,本文假设2个目标函数的权重之比为1:1,则 α 、 β 均取值为0.5。

3.3 约束条件

(1)电网约束。

电网约束主要是指加入电动汽车负荷之后,配电网各支路需要满足的潮流约束,主要包括功率平衡约束、节点电压约束和线路功率约束,分别如式(28)~(30)所示。

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{\text{cha},i} - P_{\text{load},i} = U_i \sum_{j=1}^{n_{\text{node}}} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{G,i} - Q_{\text{cha},i} - Q_{\text{load},i} = U_i \sum_{j=1}^{n_{\text{node}}} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (28)$$

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (29)$$

$$|P_{ij}| \leq P_{ij\max} \quad (30)$$

其中, $P_{G,i}$ 、 $Q_{G,i}$ 分别为节点 i 处常规发电机组的有功、无功功率; $P_{cha,i}$ 、 $P_{load,i}$ 分别为节点 i 处电动汽车的有功负荷以及除电动汽车负荷外的常规有功负荷; $Q_{cha,i}$ 、 $Q_{load,i}$ 分别为节点 i 处电动汽车的无功负荷以及除电动汽车负荷外的常规无功负荷; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 与节点 j 之间的电导、电纳; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, θ_i 、 θ_j 分别为节点 i 、 j 的相角; U_i 、 $|P_{ij}|$ 分别为接入电动汽车负荷后网络中节点 i 的电压和线路 ij 的传输功率; $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为节点 i 电压的最大幅值、最小幅值, 根据国家标准取为母线电压标准值的 $\pm 7\%$; $P_{ij\max}$ 为线路 ij 允许的最大传输功率; n_{node} 为网络中的节点总数。

此外, 还需要考虑充电桩等充放电装置的约束:

$$P(t, n) \leq P_{pile,cha} \quad (31)$$

其中, $P_{pile,cha}$ 为充电桩的最大充电功率。

(2) 电动汽车用户的费用约束。

实施分时电价以后电动汽车用户的充电费用应不大于实施统一电价时的充电费用, 即:

$$f_2 \leq \sum_{t=t_0}^{t_{end}} \sum_{n=1}^{N_i} p_0 P(t, n) \quad (32)$$

其中, p_0 为统一电价标准, 单位为元 / (kW·h)。

(3) 移动性约束。

虽然电动汽车在各时段的停驶状态是基于停车生成率随机更新的, 但随机是有约束的, 车辆在下一时段所处的区域必须是其单位时段可到达的。这是为了避免短时间内车辆移动距离过大这一不合理情况的发生。因此, 在假定划分的各区域面积与纵横比相当的前提下, 对车辆的移动性进行如下假设与约束: 假设在一个单位时段内, 电动汽车最远行驶至与当前区域相邻的区域; 若车辆的状态发生改变, 只能在当前区域或当前区域的相邻区域内变化。

结合图论的思想分析: 绘制表征各区域关系的无向图, 利用图的邻接矩阵将各区域的相邻关系进行数字化。当区域数量为 A 时, 邻接矩阵 B 为一个 $A \times A$ 阶的矩阵, 当区域 i 与区域 j 相邻时, 对应的矩阵元素 $B(i, j) = 1$, 其他情况下矩阵元素为 0。车辆状态的更新需要满足以下约束:

$$F_{area}(t+1, n) \in \{0, a, J\} \quad (33)$$

$$J = \{j | B(i, j) = 1, j \in [1, A]\} \quad (34)$$

4 算例分析

本文开展的研究以电动汽车大规模应用、充电设施普及为背景, 应用场景为停车场模式, 每个车位都配有 1 个充电桩。

针对用电需求弹性模型的求解, 算例选取文献 [20] 中实施分时电价前、后的电价和用电量数据, 由

各时段用电负荷占全天用电总负荷的比例来表征各时段电动汽车的充电概率。各时段充电车辆的平均 SOC 由 MCS 得到, 具体见附录 D 中表 D1—D3。

依据 2.3 节中弹性系数的求解方法, 以附录 D 中的数据为样本, 利用 SPSS 软件对式 (22) 进行线性回归。通过多次选取初值和迭代寻优, 得到待估参数的最优值, 计算得到的弹性系数矩阵为:

$$X_1 = \begin{bmatrix} -0.2705 & 0.1368 & 0.1417 \\ 0.1295 & -0.2632 & 0.1417 \\ 0.1295 & 0.1368 & -0.2583 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} -0.3956 & 0 & 0 \\ 0 & -0.3849 & 0 \\ 0 & 0 & -0.3778 \end{bmatrix} \quad (36)$$

对于最优分时充电电价的研究, 算例选取一个两区域系统, 系统内包含 1 个居民区和 1 个工商业区。根据《某市“十三五”新能源汽车推广应用实施方案》, 到 2020 年, 全市的新能源汽车保有量将达到 13 万辆。此外, 据统计, 城市中停车泊位的数量与车辆数的比例约为 1.2~1.5^[21]。因此, 本文算例中设置系统各时段的电动汽车总量是一组均值为 6000、标准差为 150 的随机数, 停车泊位数量设置为 8000 个, 居民区和工商业区各 4000 个。两区域系统不包含电动汽车负荷的常规用电负荷数据采用的是典型数据, 其中, 居民区采用的是文献 [22] 中的居民区典型负荷曲线, 工商业区采用的是文献 [23] 中的工商业区典型负荷曲线。两区域的地理位置示意图和相应的配电网接入情况分别如图 2 和图 3 所示, 其中区域 1 接入节点 28, 区域 2 接入节点 32。

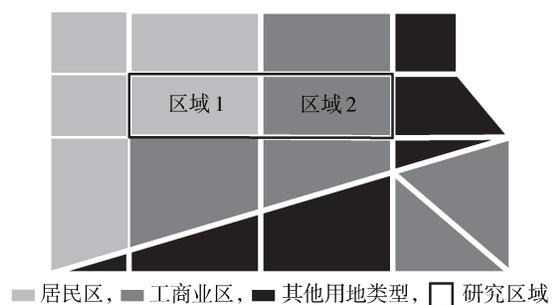


图2 区域划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of area division

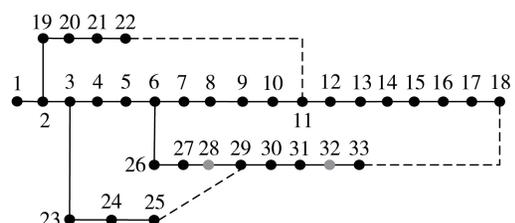


图3 配电网拓扑结构

Fig.3 Topology structure of distribution network

算例中各区域的分时充电电价时段的划分见附录D中表D4和表D5。由基于移动特性的电动汽车最优分时充电电价定价策略得到的电价结果见表1。

表1 居民区、工商业区的最优分时充电电价

Table 1 Optimal TOU charging price for residential area and industrial and commercial area

时段	充电电价 / [元·(kW·h) ⁻¹]	
	居民区	工商业区
峰	0.609	1.075
平	0.398	0.326
谷	0.329	0.149

算例中设置的电动汽车分为2类^[14]:一类是小型车,电池容量为18 kW·h,每100 km耗电约为10 kW·h;另一类是普通车,电池容量为30 kW·h,每100 km耗电约为21 kW·h。小型车与普通车的数量比例为3:7。假设电动汽车以恒定功率充电,充电功率为15 kW。实施最优分时充电电价前、后各区域包含电动汽车负荷的总用电负荷曲线见图4。

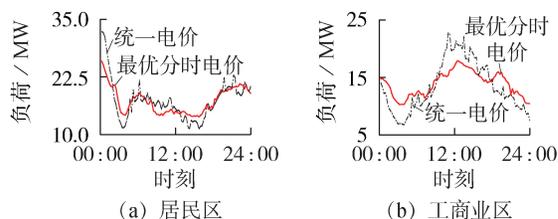


图4 实施最优分时充电电价前、后总用电负荷曲线

Fig.4 Total load curves before and after implementation of optimal TOU charging price

利用MATPOWER软件仿真计算配电网一天的网络损耗,仿真结果如图5所示。

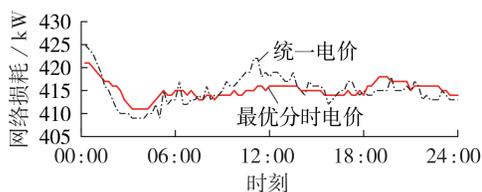


图5 实施最优分时充电电价前、后配电网网络损耗

Fig.5 Distribution network loss before and after implementation of optimal TOU charging price

统一电价设定为0.5元/(kW·h),实施最优分时充电电价前、后各区域电动汽车用户的日充电总费用如表2所示。

表2 实施最优分时充电电价前、后各区域日充电总费用

Table 2 Total daily charging cost before and after implementation of optimal TOU charging price

区域	日充电总费用 / 万元	
	统一电价	最优分时电价
居民区	10.88	9.85
工商业区	7.73	5.41

由仿真结果可知,实施最优分时充电电价后,2个研究区域的用电负荷曲线的波动性降低,峰谷差减少,配电网全天的网络损耗降低,区域内电动汽车用户的日充电总费用降低,实现了电网、用户的双赢。

5 结论

本文基于停车特性建立了电动汽车的移动特性模型,基于吸引力模型建立了考虑SOC的电动汽车需求价格弹性模型,该模型能准确反映电动汽车用户充电需求对电价的响应。在移动性模型、需求响应模型的基础上,提出了基于电动汽车移动特性的最优分时充电电价定价策略,仿真算例结果表明,基于本文所提策略制定的分时电价能有效地引导电动汽车的充电行为,进而降低区域用电负荷曲线的波动性和配电网的网络损耗,减少用户的充电费用。在电动汽车大规模应用的前景下,本文所提策略对统筹电网、电动汽车用户双方的利益具有积极的意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 葛晓琳,裴晨皓. 考虑电动汽车随机特性的机组组合问题研究[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):77-84. GE Xiaolin,PEI Chenhao. Study on unit commitment problem considering stochastic characteristics of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):77-84.
- [3] 中国汽车技术研究中心. 新能源汽车蓝皮书:中国新能源汽车产业发展报告(2018)[R]. 北京:社会科学文献出版社,2018.
- [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] 张振夫,黄小庆,曹一家,等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):24-29. ZHANG Zhenfu,HUANG Xiaoqing,CAO Yijia,et al. Charging load calculation considering TOU for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):24-29.
- [6] 高亚静,吕孟扩,梁海峰,等. 基于离散吸引力模型的用电需求价格弹性矩阵[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):103-107,144. GAO Yajing,LÜ Mengkuo,LIANG Haifeng,et al. Power demand price elasticity matrix based on discrete attraction model[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(13):103-107,144.
- [7] 高亚静,吕孟扩,王球,等. 基于离散吸引力模型的电动汽车充放电最优分时电价研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3647-3653. GAO Yajing,LÜ Mengkuo,WANG Qiu,et al. Research on optimal TOU price considering electric vehicles charging and discharging based on discrete attractive model[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3647-3653.
- [8] 贺继锋,陈杰军,黄家祺,等. 基于区域峰谷分时电价的电动汽

- 车有序充电研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(6): 23-29.
HE Jifeng, CHEN Jiejun, HUANG Jiaqi, et al. Research on electric vehicle orderly charging based on regional peak-valley time-of-use price[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(6): 23-29.
- [9] 郭永新, 王高, 齐二石. 品牌、价格和促销对市场份影响的模型研究[J]. 管理科学学报, 2007, 10(2): 59-65.
GUO Yongxin, WANG Gao, QI Ershi. Model study of the effects of brand, price and promotion on market share[J]. Journal of Management Sciences in China, 2007, 10(2): 59-65.
- [10] ELBANHAWY E Y, DALTON R, SHANKAR V N, et al. Hybrid-OD matrix based simulation approach to identify charging hotspots in transport network [C] // 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Dearborn, MI, USA: IEEE, 2014: 1-6.
- [11] BAUER D, RICHTER G, ASAMER J, et al. Quasi-dynamic estimation of OD flows from traffic counts without prior OD matrix[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(6): 2025-2034.
- [12] LI X H, KURTHS J, GAO C, et al. A hybrid algorithm for estimating origin-destination flows [J]. IEEE Access, 2018, 6: 677-687.
- [13] 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 442-450.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Yingmei. Control strategy and application of distributed electric vehicle energy storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 442-450.
- [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. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [15] 鲍彦, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.
BAO Yan, JIA Limin, JIANG Jiuchun, et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126.
- [16] 王瑞. 基于用地区位分析的停车需求预测研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
WANG Rui. The research on parking demand forecast based on the analysis of the land location[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [17] 王雅坤. 考虑含风电场和电动汽车入网的电力系统协同优化调度[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
WANG Yakun. Synergistic optimal dispatch of power system considering integration of wind farm and electric vehicles [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [18] SOONG T T. Fundamentals of probability and statistics for engineers[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004: 37-39.
- [19] 聂江洪, 曾伟民. 在电力市场中引入电力需求弹性的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 84-89.
NIE Jianghong, ZENG Weimin. Research on introducing electricity demand elasticity into electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 84-89.
- [20] 吕孟扩. 适用于电动汽车充放电的分时电价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
LÜ Mengkuo. Research on TOU price considering electric vehicles charging and discharging[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [21] 刘怡. 基于小汽车保有量的城市停车需求预测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
LIU Yi. Research on parking demand forecasting of city based on car ownership[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [22] 杨建萍. 南京市居民用电负荷特性分析与思考[J]. 电力需求侧管理, 2002, 4(2): 24-27.
YANG Jianping. Analysis and study of Nanjing residential load profile[J]. Power Demand Side Management, 2002, 4(2): 24-27.
- [23] 代家强. 面向工商业负荷的智能用电量管理建模及优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
DAI Jiaqiang. Study on intelligent energy management modeling and optimization of electricity for commercial and industrial loads[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

作者简介:



陈中

陈中(1975—),男,江苏南京人,研究员,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail: zhongchen@seu.edu.cn);

刘艺(1994—),女,江苏淮安人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车与电网互动技术(E-mail: liuyiseu@163.com);

周涛(1991—),男,江苏南京人,博士研究生,主要研究方向为电动汽车与电网互动技术(E-mail: zhoutaoguo@163.com)。

(编辑 陆丹)

Optimal time-of-use charging pricing strategy of EVs considering mobile characteristics

CHEN Zhong^{1,2}, LIU Yi^{1,2}, ZHOU Tao^{1,2}, XING Qiang^{1,2}, DU Puliang^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the large-scale development of the EV (Electric Vehicle) industry, it is of great significance to establish a reasonable price mechanism for guiding the ordered charging of EVs. The biggest difference of EV load from conventional load is its mobility. Based on the parking generation rate theory, the EV mobility model considering randomness is established. In view of the characteristics of EV users, an EV demand price elasticity model is established considering the SOC (State Of Charge) of batteries, and an optimal time-of-use charging pricing strategy of EVs based on mobile characteristics is proposed to balance the interests of both power grid and EV owners. Simulative results of example show that the optimal time-of-use charging price based on the proposed model and strategy can smooth the load curve and reduce the cost of EV owners.

Key words: electric vehicles; mobile characteristics; time-of-use charging price; demand elasticity

附录 A

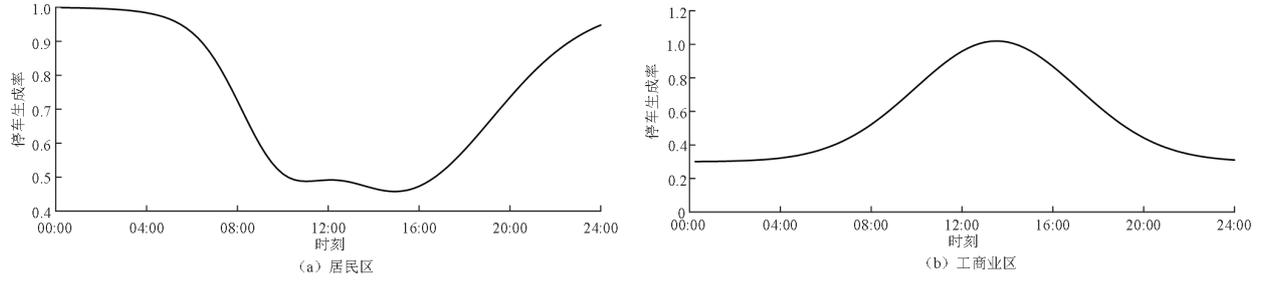


图 A1 典型停车生成率曲线
Fig.A1 Typical parking generation rate curves

附录 B

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \partial q_1 / q_1 \\ \partial q_2 / q_2 \\ \partial q_3 / q_3 \end{bmatrix} &= \mathbf{E}_1 \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{p_1} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC1}}}{s_{\text{SOC1}}} \end{bmatrix} + \mathbf{E}_2 \begin{bmatrix} \frac{\partial p_2}{p_2} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC2}}}{s_{\text{SOC2}}} \end{bmatrix} + \mathbf{E}_3 \begin{bmatrix} \frac{\partial p_3}{p_3} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC3}}}{s_{\text{SOC3}}} \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^1 & \varepsilon_{12}^1 \\ \varepsilon_{21}^1 & 0 \\ \varepsilon_{31}^1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{p_1} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC1}}}{s_{\text{SOC1}}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^2 & \varepsilon_{12}^2 \\ \varepsilon_{21}^2 & 0 \\ \varepsilon_{31}^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p_2}{p_2} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC2}}}{s_{\text{SOC2}}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^3 & \varepsilon_{12}^3 \\ \varepsilon_{21}^3 & 0 \\ \varepsilon_{31}^3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p_3}{p_3} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC3}}}{s_{\text{SOC3}}} \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^1 & \varepsilon_{11}^2 & \varepsilon_{11}^3 \\ \varepsilon_{21}^1 & \varepsilon_{21}^2 & \varepsilon_{21}^3 \\ \varepsilon_{31}^1 & \varepsilon_{31}^2 & \varepsilon_{31}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{p_1} \\ \frac{\partial p_2}{p_2} \\ \frac{\partial p_3}{p_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{12}^1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{12}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{12}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial s_{\text{SOC1}}}{s_{\text{SOC1}}} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC2}}}{s_{\text{SOC2}}} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC3}}}{s_{\text{SOC3}}} \end{bmatrix} = \tag{B1} \\
 &= \begin{bmatrix} \beta_1(1-S_1) & -\beta_1 S_2 & -\beta_1 S_3 \\ -\beta_1 S_1 & \beta_2(1-S_2) & -\beta_1 S_3 \\ -\beta_1 S_1 & -\beta_1 S_2 & \beta_3(1-S_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{p_1} \\ \frac{\partial p_2}{p_2} \\ \frac{\partial p_3}{p_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_2(1-S_1) & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2(1-S_2) & 0 \\ 0 & 0 & \beta_2(1-S_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial s_{\text{SOC1}}}{s_{\text{SOC1}}} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC2}}}{s_{\text{SOC2}}} \\ \frac{\partial s_{\text{SOC3}}}{s_{\text{SOC3}}} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{X}_1 &= \begin{bmatrix} \beta_1(1-S_1) & -\beta_1 S_2 & -\beta_1 S_3 \\ -\beta_1 S_1 & \beta_2(1-S_2) & -\beta_1 S_3 \\ -\beta_1 S_1 & -\beta_1 S_2 & \beta_3(1-S_3) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} \varepsilon_{12}^1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{12}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{12}^3 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

附录 C

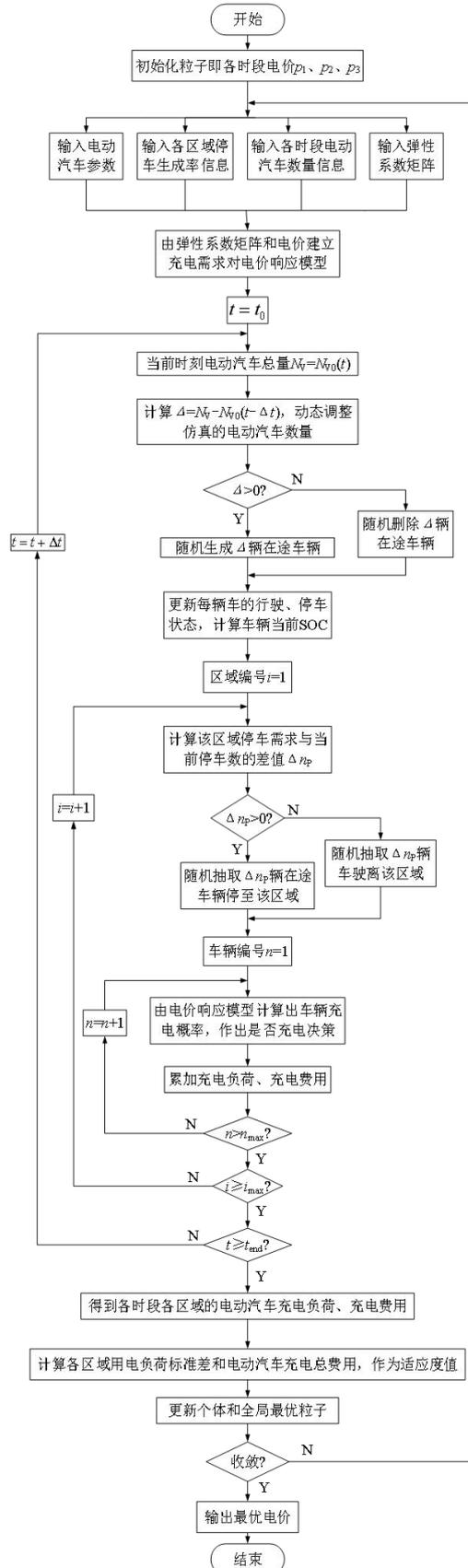


图 C1 电动汽车最优分时充电电价定价策略流程图
Fig.C1 Flowchart of optimal TOU pricing strategy for EVs

附录 D

表 D1 各时段电价

Table D1 Electricity price for each period

月份	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]		
	峰时段	平时段	谷时段
1	0.263	0.191	0.168
2	0.193	0.193	0.175
3	0.194	0.194	0.118
4	0.196	0.186	0.087
5	0.197	0.154	0.085
6	0.199	0.199	0.119
7	0.200	0.200	0.131
8	0.202	0.202	0.147
9	0.203	0.189	0.091
10	0.204	0.149	0.078
11	0.206	0.206	0.152
12	0.213	0.207	0.202

表 D2 各时段电动汽车充电概率

Table D2 EV charging probability for each period

月份	充电概率		
	峰时段	平时段	谷时段
1	0.32378	0.34207	0.35414
2	0.31724	0.33910	0.34366
3	0.31857	0.34031	0.34112
4	0.31576	0.33502	0.34922
5	0.32016	0.33249	0.34736
6	0.32495	0.33140	0.34365
7	0.32535	0.33214	0.34252
8	0.32726	0.33125	0.34149
9	0.32634	0.33367	0.34000
10	0.32205	0.33156	0.34639
11	0.31506	0.33311	0.35183
12	0.31779	0.33231	0.34989

表 D3 各时段平均 SOC

Table D3 Average SOC for each period

月份	平均 SOC		
	峰时段	平时段	谷时段
1	0.25480	0.43627	0.44656
2	0.37157	0.43574	0.44265
3	0.33668	0.43586	0.51469
4	0.31724	0.47045	0.55174
5	0.30638	0.47449	0.5444
6	0.30685	0.43358	0.52445
7	0.30638	0.39685	0.48483
8	0.27385	0.39379	0.46064
9	0.29133	0.47086	0.53634
10	0.27300	0.48151	0.57192
11	0.26991	0.33963	0.45953
12	0.26174	0.32963	0.40279

表 D4 居民区分时充电电价时段划分

Table D4 Partition of TOU charging price for residential areas

时段	对应时间
峰时段	00:00—02:00, 08:00—13:00, 17:00—22:00
平时段	13:00—17:00, 22:00—23:00
谷时段	02:00 至次日 08:00, 23:00—24:00

表 D5 工商业区分时充电电价时段划分

Table D5 Partition of TOU charging price for industrial and commercial areas

时段	对应时间
峰时段	09:00—18:00
平时段	07:00—09:00, 18:00—22:00
谷时段	00:00—07:00, 22:00—24:00