

# 考虑用户特征的小区居民电动汽车充电控制系统建模与优化方法探究

李文惠, 党亚峥

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年7月19日; 录用日期: 2023年8月21日; 发布日期: 2023年8月29日

## 摘要

电动汽车(EV)的充电多具有各种主观与客观的限制条件, 虽然目前已有较多针对充电方法的讨论, 但如何在考虑用户特征的前提下控制车主与充电商的各自需求被同时满足尚未被深入研究。为探究小区居民电动汽车的最佳充电方式, 本文提出了一系列考虑用户特征的主从博弈充电优化控制方法, 首先建立车主决策模型对车主意愿信息进行划分, 再以最小化充电成本、减小充电波动以及最大程度满足居民用户充电的需求量为目标函数, 负载约束、充电机分配、充电电量、等待时间作为约束条件, 基于主从博弈思想建立有序与无序充电的混合整数规划模型, 并采用贪心算法对比分析有序充电与无序充电中各模式的应用场景, 仿真结果表明有序充电在成本与负荷方面具有明显的比较优势, 同时综合考虑车主意愿的充电模式能够有效达到“削峰填谷”的效果。

## 关键词

有序充电, 无序充电, 主从博弈, 混合整数规划, 车主意愿

## Research on Modeling and Optimization Method of Charging Control System of Residential Electric Vehicles Considering User Characteristics

Wenhui Li, Yazheng Dang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Aug. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The charging of electric vehicles (EV) is subject to various subjective and objective constraints. Despite there have been more debate about charging methods, how to meet the respective needs of owners and chargers while considering the characteristics of users has not been thoroughly studied. In order to explore the best way to charge electric vehicles in the community, this article constructs the owner's decision model to divide the owner's intention firstly. Then, a mixed integer programming model of ordered and disordered charging was established based on the master-slave game idea, with the objective function of minimizing the charging cost, reducing the charging fluctuation and maximizing the charging demand of residential users, and the constraint conditions of load constraint, charging machine allocation, charging capacity and waiting time. And the greedy algorithm is used to compare and analyze the application scenarios of each mode in orderly charging and disorderly charging. It is concluded that orderly charging has obvious comparative advantages in cost and load. Meanwhile, the charging mode considering the wishes of owners can effectively achieve the effect of "cutting peak and filling valley".

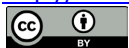
## Keywords

Orderly Charging, Unordered Charging, Master-Slave Game, Mixed Integer Programming, Owner's Intention

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着新能源电动汽车(electrical vehicle, EV)的普及以及充电控制系统的发展,居民用户和充电供应商的需求逐渐形成多元化的发展趋势,但目前电动汽车作为一种新兴的可持续发展的交通方式,其发展仍然面临着诸多挑战,例如充电桩实际数量较人们需求的增长较为滞后,并且在充电速度方面与传统汽车相比,电动汽车充电速度较为缓慢,因此设计合理化的充电方式不仅可以最大化的利用有限资源,而且可以满足用户多元化的调度需求。

电动汽车目前采用的配电系统由传统配电系统向微电网方向发展,即主要由分布式电源以及储能装置等不同设备构成小型配电系统[1],本文各种充电模式的搭配基于此电网系统的推广与应用。充电系统的主要应用环境是在小区设置充电桩供居民充电,2022年我国公共充电基础设施增长约65万台,累计数量达180万台[2]。因此,为电动汽车进行充电的相关理论设计已迫在眉睫,不仅有利于充电商与用户之间的协调互通,而且在充分利用社会资源的前提下实现EV的良好生态发展模式。

首先,分时电价的应用在控制充电系统的相关研究方面起了至关重要的作用。文献[3][4][5]都对使用分时电价的合理性得出了一致的结论:分时电价实现了供需两侧的双赢,满足经济性以及保护电网的需求。但在小区居民EV的充电背景下,还要考虑车主的消费意愿以及是否愿意配合参与调度,将实际的情况分为分时电价与固定电价两种应用模式。

其次在EV优化充电控制系统的研究方面,有序充电应用较为广泛,大致可分为从充电商角度出发和从用户角度出发两种研究策略。从充电商角度,文献[6]提出一种考虑直流充电桩最优充电效率的电动

汽车有序充电模型, 实验结果表明, 考虑直流充电桩最优充电效率的有序充电模型能较好地降低负荷波动率; 文献[7]从需求建模、负荷预测、负荷计算三个方面对电动汽车充电负荷预测方法进行分析; 再从有序充电系统、通信控制方案、控制算法分析等方面对有序充电控制策略进行研究, 确保控制过程能够有序开展, 保障电动汽车具有良好的负荷状态。从用户角度, 文献[8]提出一种基于布谷鸟算法的电动汽车有序充电策略, 不仅能减少电费支出, 还能实现对配电网负荷的削峰填谷; 文献[9]提供了住宅小区规模化电动汽车有序充电的工程方案, 减少用户充电费用并达到削峰填谷的效果。基于以上两个方面, 本文希望在供需两侧达到均衡的最优解, 从而采用了主从博弈的思想来建立有序充电的模型, 文献[10]已论证通过主从博弈、综合能源系统能合理地引导电动汽车有序充电提高运行的整体经济收益。

针对上述问题, 本文在已有研究基础上进一步创新, 提出了一系列考虑用户特征的主从博弈充电优化控制方法, 在设定已知每辆充电电动车的预计充电时间以及期望电荷等基本信息的基础上, 考虑实际充电过程的应用情景, 将有序充电方式划分为即充即走、连续充电与不连续充电三种不同的模式, 而且在三种模式的选择过程中, 融入对车主主观性格与客观时间等因素的考虑, 符合实际情况中人为因素必然会对充电过程造成的干扰。针对模型的建立, 本文根据变量的特点采用混合整数规划来建立模型, 并根据充电供应商与小区居民的特征建立主体和从体两套模型进行博弈求解, 最终形成基于主从博弈思想建立的混合整数规划模型来探究不同有序充电模式的效果。采用启发式算法中的贪心算法对模型进行求解, 先计算上层规划, 再添加下层规划的约束条件逐步求解, 将不同充电模式的结果进行比较。

本文在进行创新性工作及解决的关键问题主要考虑: 将车主意愿的模糊因素融入到模型内, 探究考虑车主意愿的混合充电模式的可行性; 同时基于主从博弈思想建立混合整数规划模型, 意图实现充电供应商与小区居民用户的利益平衡。

## 2. EV 充电系统信息输入

为了实现充电系统的有效控制, 必须对充电有关前提信息按照规则进行设置与输入。在探究充电方法过程各类信息中, 首先应当考虑车主意愿的因素, 因此对车主意愿进行划分, 以此来实现 EV 入网“削峰填谷”的效果。实际的充电控制过程采用分时电价的调配方式, 对用户充电行为进行引导, 同样基于在满足居民用户充电需求的基础上, 再利用不同时段的电价差异, 合理安排充电计划使得同时满足用户需求并降低运营成本, 促进“车-网”系统的安全高效运行。

### 2.1. 时间信息处理

国家电网电价各省市执行标准不同, 但基本在一小范围区间维持稳定, 基于此本文参照湖南的电价政策进行充电站购电的分时电价安排[11], 如表 1 所示:

**Table 1.** Time-of-use tariff

**表 1.** 分时电价

	时段	电价/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
低谷	23:00~次日 7:00	0.5003
平段	7:00~11:00, 14:00~18:00	0.7003
高峰	11:00~14:00, 18:00~23:00	0.8503

根据分时电价应用情况以及负荷限制, 将用户日常的时点数据转换为能够对应一天 96 个时段的分钟数, 每段分钟数为  $T = 15 \text{ min}$  [12], 并定义第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) 个时间段的电价为  $P_i$  以及第  $n$  辆电动车允许

充电的最早和最晚时段为:

$$T_{n,early} = \left\lceil \frac{\text{minute}(t_{n0})}{T} \right\rceil + 2 \quad (1)$$

$$T_{n,late} = \left\lfloor \frac{\text{minute}(t_{n1})}{T} \right\rfloor \quad (2)$$

$\text{minute}(t)$ 的作用是把实际时点转换为分钟数,再用 $\lceil x \rceil$ 计算不超过 $x$ 的最大整数来表示一天中所处的时间段。例如当居民电动汽车在 07:44 到达小区充电桩,则最早可以在 07:45 进行充电,根据公式(1)有  $T_{n,early} = (7 \times 60 + 45)/15 + 2 = 33$ ,此时对应一天中第 33 个时段。

## 2.2. 充电控制模式划分

根据一级指标,本文将充电控制的策略划分为有序与无序两大种充电模式。有序充电提高了充电效率,减少非必要能耗,也满足居民用户各类充电需求;而无序充电则是在可用情况下充电桩随时可提供充电服务,可能会导致充电负荷与原有负荷高度重合甚至叠加在一起,形成负荷双高峰,从而导致安全隐患,损害公共安全。

再结合车主自身意愿以及电价激励政策二级分类指标,可将目前的有序与无序充电控制策略细分为以下三种模式,见表 2:

**Table 2.** Comparison of charging modes

**表 2.** 充电模式对比

模式一	无序充电	即充即走模式	促进车主参与微电网调峰调度,控制此种模式采用的固定电价选取分时电价中较高档次的电价
模式二	有序充电	连续充电模式	采用分时电价,每台电动汽车充电过程中不可中断,直至所能达到的充电范围,可以减少充电中断带来的损耗
模式三		不连续充电模式	充电过程可中断,具体方法是在期望充电时间内挑选电价小的时间段充电,以起到参与调度的作用

出于供电系统进行充电控制的可操作性以及对比的方便性,三种模式采取相同的固定功率,符合目前恒流充电应用较为广泛的现状。

## 2.3. 车主意愿划分

车主根据自身意愿针对上述充电控制策略选择合适的充电模式。车主意愿包括两个方面:1) 车主性格;2) 电动汽车停留时间以及达到期望电荷所需时间。实际应用中首先考虑后者以保证充电计划正常实施,因此在度量车主意愿时,首先计算电动汽车满电电量所需时段个数并记为  $h$ ,停留时间不足  $h$  的车主被自动归类为模式一充电群体,若判断停留时间大于  $h$  则继续考虑车主性格,分为谨慎型(模式一、二)、无明显特征型(模式一、二、三)和冒险型(模式二、三)三种,其中每类车主选择对应充电模式均为等概率。车主意愿与模型选择之间的联系见图 1。

## 2.4. 充电分配信息及决策矩阵的定义

实现充电的控制策略关键是要对获取的车主信息进行输入并记录始末状态从而进行决策。设定小区内充电桩共  $M$  台,每台充电桩输出固定充电功率为  $P$  (单位 kW)。每台 EV 进出充电站时,充电管理系统

都会对必要信息进行手动或自动记录, 当用户充电需求无法被满足时, 用户可更改充电方案或服从充电管理系统安排。图 2 表示 EV 的初始状态记录以及用户设定的期望充电完成的 EV 状态:

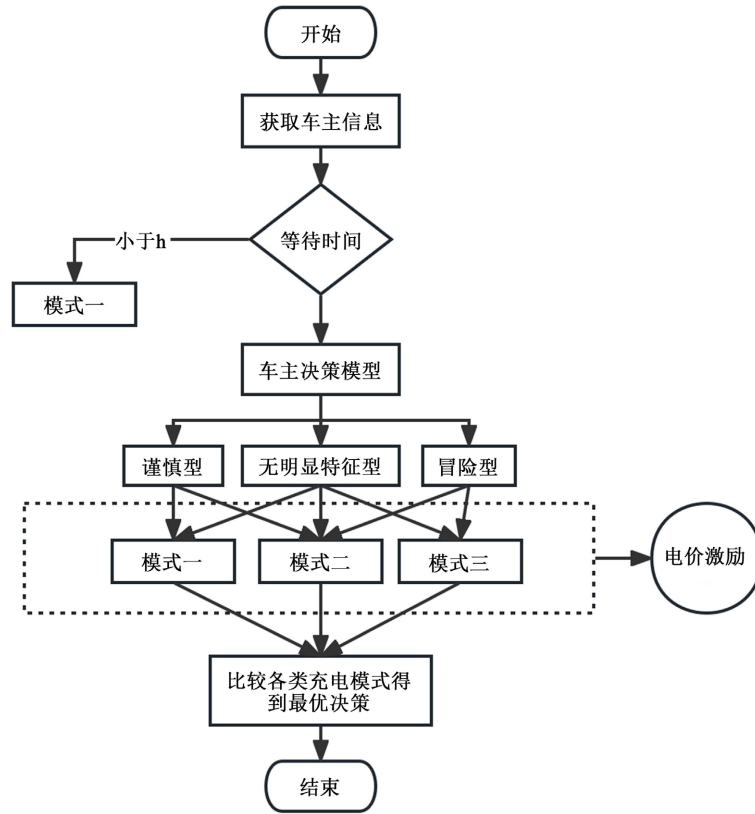


Figure 1. Owner's wish and model choice  
图 1. 车主意愿及模型选择

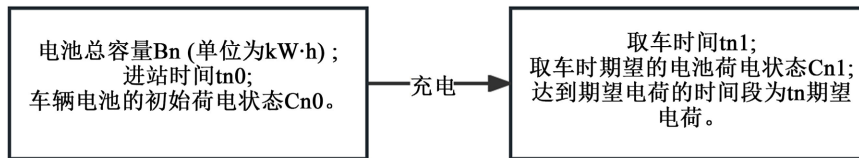


Figure 2. Expected change of charge  
图 2. 充电预期变化

在采用混合整数规划模型的前提下, 为表示电动汽车在某一段时间段内的充电安排, 采用 0~1 矩阵  $F_{M \times J \times N}$  表示  $N$  辆电动汽车充电决策矩阵, 当第  $n$  辆电动汽车第  $i$  个时间段在充电机  $m$  充电时, 定义矩阵元素  $f_{i,m}^n = 1$ , 否则  $f_{i,m}^n = 0$ 。

### 2.5. 用户充电程度的衡量

由于每位居民用户尤其自身不同的充电需求, 无法简单的以充电电量作为用户充电程度的衡量指标, 有必要为用户充电效果选择一个具体的指标来衡量。车主的目的是满足 EV 的充电需求, 充电程度越高, 车主意愿越大程度被满足, 因此定义电量差值(期望电量 - 实际充电电量)  $S_n$  来衡量用户充电需求被满足的程度。

在实际应用场景中, 电量差值会受到多因素的影响, 有必要为每一辆电动汽车的  $S_n$  设置相应的足够大的影响系数  $\Phi_n$  以防止系统决策偶然误差。  $\Phi_n$  的值由以下两个部分组成:

1)  $\Phi_{1n}$ : 由于充电机的数量等服务能力方面存在限制, 要根据停靠顺序为每辆车安排充电计划, 会对  $\Phi_n$  的值产生约束, 先来的电动汽车( $n$  较小)由于要被优先满足, 其影响系数要比后来的 EV 大, 使得存在的电量差值尽量由后来的 EV 产生。

2)  $\Phi_{2n}$ : 除上述车辆到达的客观因素外, 用户充电的急需度这一主观因素也应当在考虑范围内。规定 EV 投入使用的时间先后作为急需度的判断标准, 例如居民  $a$  的 EV 充电后的预计投入使用时间是一周后, 相比之下居民  $b$  将在电量充足后立马投入使用, 无论  $a$  与  $b$  到达的先后程度如何, 居民  $B$  的急需度大于居民  $A$ , 即  $\Phi_{2B} > \Phi_{2A}$ 。

### 3. 车主意愿与分时电价激励模式相结合的 EV 充电控制系统建模

在考虑选择哪种充电方式时, 应当综合考虑充电供应商与用户的利益, 二者属于相互博弈的利益主体, 均具有自我趋利属性。作为博弈主体的充电供应商, 依据经营准则应将满足小区居民的 EV 充电需求, 其次考虑自身电费成本, 最终收益来源于购电成本与收取的充电服务费之间的价差; 居民用户作为博弈从体, 则更侧重于充电需求是否被满足, 遂建立主从博弈优化模型, 加以考虑意愿因素的车主决策模型, 控制充电站系统的充电策略。

主从博弈模型的主要优势在于可以实现车主与充电商之间的利益平衡。在这个过程中, 博弈主体具有先天的领导优势能够率先做出决策, 即充电商抢占先机满足自己的目标, 然后将该目标作为博弈从体约束的条件, 求解出的从体目标又作为主体的约束, 通过这种关系的不断应用最终形成车主与充电商之间的均衡状态。另外在考虑车主意愿时, 基于车主客观与主观方面的特征对车主决策进行分类, 以匹配对应的模型进行求解。模型简要思路如图 3 所示。

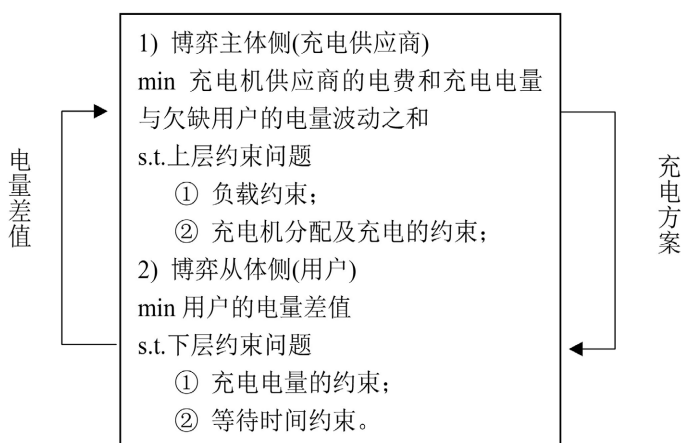


Figure 3. Thinking of Master-slave game model  
图 3. 主从博弈模型思路

#### 3.1. 车主决策模型的建立

由于根据车主意愿的差异性对车主充放电模式进行决策具有模糊不确定性, 因此利用 MATLAB 自带的模糊控制器, 基于模糊逻辑进行建模, 输入变量的选择来源于车主意愿, 最终通过模糊推理得到最有可能的车主决策。图 4 展示了利用模糊控制器进行车主决策的基本流程。

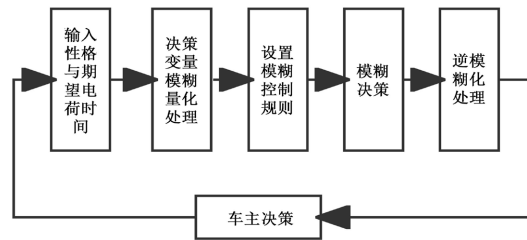


Figure 4. Fuzzy reasoning procedure  
图 4. 模糊推理过程

图 5 显示了模糊控制器车主性格输入变量的隶属度函数曲线, 车主性格系数在 $[0.5, 1.5]$ 上符合正态分布[13], 当系数接近 1.5 时, 车主性格表现为冒险型。图 6 表示在 $[0, 96]$ 范围内期望电荷时间隶属度函数, 随着充电电荷越长, 选择模式二和模式三的概率就会越大。图 7 表示在 $[0, 1]$ 内输出变量的隶属度函数, 最终得到如图 8 所示的模糊控制器的输出特性曲面,

展示出综合考虑车主意愿后形成的充电决策, 输出值接近于 1 的车主更倾向于模式三, 反之当输出值越接近于 0 时, 车主往往会选择模式一。

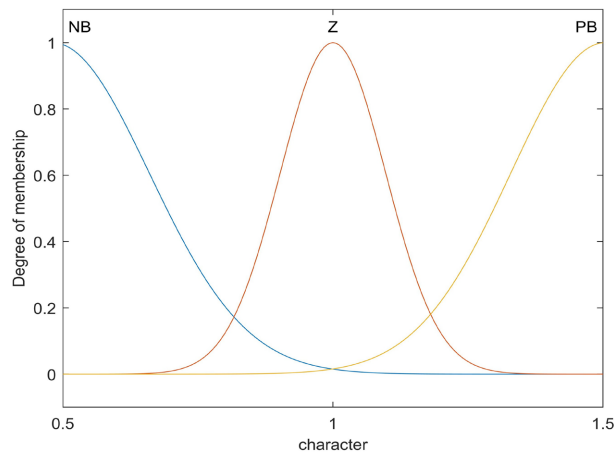


Figure 5. Character membership function  
图 5. 性格隶属度函数

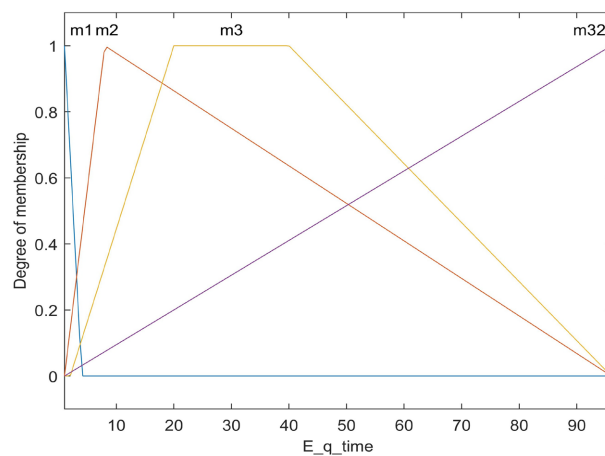


Figure 6. Expected charge time membership function  
图 6. 期望电荷时间隶属度函数

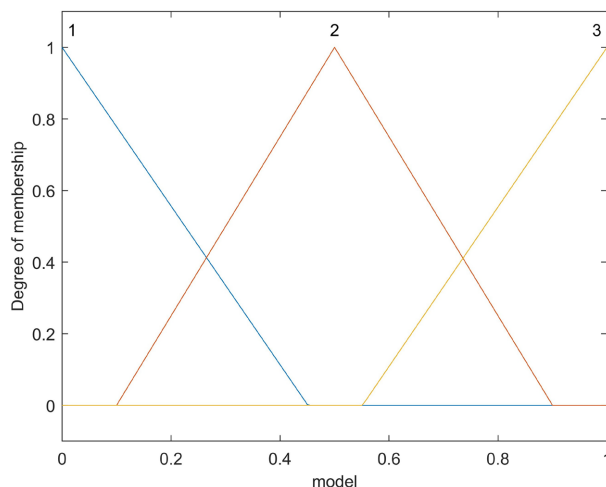


Figure 7. Output membership function  
图 7. 输出隶属度函数

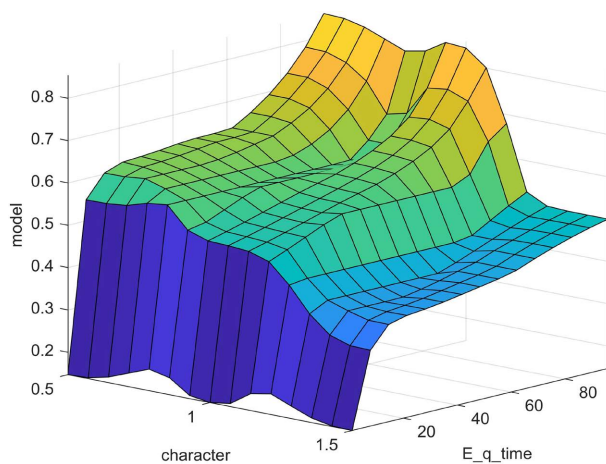


Figure 8. Fuzzy controller output characteristic surface  
图 8. 模糊控制器输出特征曲面

## 3.2. 充电过程控制系统建模

### 3.2.1. 目标函数设置

#### 1) 博弈主体侧

考虑到充电供应商的实际诉求与主从博弈模型的设置规则, 博弈主体侧目标函数应当包含两部分:

① 保证充电机供应商的电费成本最低, 计算第  $i$  个时间段内供电总成本为:

$$C_i = P_0 P \frac{T}{60} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{i,m}^n \quad (3)$$

其中  $P_0$  为固定电价, 充电商购电总成本即为电价、功率与对应时间的乘积并同时考虑第  $n$  辆电动汽车第  $i$  个时间段在充电机  $m$  充电的实际情况。

② 保证充电电量与欠缺用户的电量(即电量差值)波动最小, 其中波动的衡量可以采用实际充电电量与欠缺用户的电量的差的平方来表示, 实际充电电量为功率与时间的乘积并同时考虑第  $n$  辆电动汽车第  $i$  个时间段在充电机  $m$  充电的实际情况, 得到波动的表达式为:



$$\sigma_n = \sum_1^n \left( P \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{i,m}^n \frac{(t_{n1} - t_{n0})}{60} - S_n \right)^2 \quad (4)$$

结合以上两方面的因素, 最终博弈从体侧目标函数表达式为:

$$\min_{F_{N \times I \times M}, E_{N \times M}, S} = \sum_{i=1}^I C_i + \sum_1^n \sigma_n \quad (5)$$

## 2) 博弈从体侧

博弈从体侧的目标函数应当使得用户的电量差值最小, 并结合影响系数对电量差值的作用效果, 得到:

$$\min_{F_{N \times I \times M}, E_{N \times M}, S} = \sum_{n=1}^N (\Phi_{1n} + \Phi_{2n}) S_n \quad (6)$$

### 3.2.2. 约束条件控制

#### 1) 博弈主体侧

##### ① 充电桩分配约束

$$\sum_{n=1}^N f_{i,m}^n \leq 1 \quad \forall i, m \quad (7)$$

式(7)对充电桩分配进行约束, 表示在任意时间段内每台充电桩上最多只能有一辆电动汽车在充电, 在决策矩阵中体现为行和为 1。

##### ② 负载限制

$$P \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{i,m}^n \leq Q_i \quad \forall i \quad (8)$$

式(8)表示对负载进行限制的约束条件, 在式(7)的基础上与相应的功率相乘, 使其小于当前时段的电荷, 其中  $Q_i$  表示在任意时间段内充电站对 EV 充电的功率最大值。

##### ③ EV 分配约束

$$\sum_{i=1}^I f_{i,m}^n \leq 1 \quad \forall i, m \quad (9)$$

式(9)表示任意 EV 只能在被分配到的充电桩上进行充电。在期望时间内, 将期望电荷转化成相应时间, 并进行选择, 同时对所有充电桩限制为只能占用一辆车, 欠缺的电量将会加入到电量差值。

以上三个约束条件为即充即走、连续充电与不连续充电三种模式共同具有。

##### ④ 连续充电控制条件

$$f_{i+1,m}^n - f_{i,m}^n = 0 \quad (10)$$

式(10)表示充电的时间段必须是连续的, 即汽车必须在两个相邻的时间段进行充电。

## 2) 博弈从体侧

##### ① 充电电量约束

$$B_n (C_{n, \text{期望电荷}} - C_{n0}) - S_n \leq \sum_{m=1}^M \sum_{n=T_n, \text{期望电荷}}^{T_n, \text{期望电荷}} P \frac{T}{60} f_{i,m}^n \quad (11)$$

式(11)对充电电量进行约束, 用户期望达到的电量与电量差值的差要不大于实际充电量, 表示电量缺失的部分只能由电量差值引起, 排除了其他干扰因素。

## ② 电量差值的非负约束

$$S_n \geq 0 \quad \forall n \quad (12)$$

式(12)约束所有电量差值必须非负, 这符合客观条件。

以上两个约束条件为即充即走、连续充电与不连续充电三种模式共同具有。

## ③ 即充即走模式控制

$$t_{n\text{期望电荷}} - t_{n0} < h \quad (13)$$

式(13)是用户的等待时间小于充满电所需时间, 此种情形下的居民用户才会对即充即走模式进行选择。

## ④ 有序充电控制条件

$$t_{n\text{期望电荷}} - t_{n0} \geq h \quad (14)$$

式(14)是用户的等待时间不低于充满电所需时间, 与式(13)中的约束条件为互补关系。

## ⑤ 不连续充电控制条件

$$t_{n\text{期望电荷}} \leq t_{n1} \quad (15)$$

式(15)限制与到达时间和离开时间的时段相比, 期望电荷对应的时段比较小, 居民用户才会在有序充电模式中选择不连续充电。

### 3.3. 优化模型求解设计

将求解过程分为以下几个阶段进行:

#### 1) 数据生成

本文所使用的数据均依据来源于实际情况的参数分布, 并基于各种参数分布利用蒙特卡洛模拟法生成所需要的数据, 包括 EV 充电所能用到的各种车主信息、影响系数以及最长等待时间等。

#### 2) 主从博弈模型求解

首先在具体模式的选择中, 采用模糊逻辑进行建模的方法得到车主决策, 其次在模型实现上总体使用 MATLAB 中的 CPLEX 求解器调用启发式算法中的贪心算法, 先求解上层主体规划, 再添加下层从体规划的约束条件逐步求解, 采用双目标规划中的目标分层法将模型分成两步求解:

第一步, 求解博弈主体侧规划, 得到最佳充电决策矩阵  $f_{i,m}^n$  的解;

第二步, 将第一步得到的最佳决策矩阵带入到博弈从体规划模型中, 得到电量差值  $S_n$  的解, 再带回到博弈主体模型中作为已知量进行求解。

通过以上两个步骤的反复博弈, 最终得到使得博弈主体侧和博弈从体侧共同均衡的最优解。在每个步骤具体的求解过程中, 每辆车都要依据影响系数的设置规则, 然后将排序好的 EV 依次遍历所有 M 台充电机, 计算不同情况下模型的解。

具体的模型求解流程如图 9 所示。

## 4. 模拟仿真算例分析

### 4.1. 仿真过程关键问题说明

#### 4.1.1. 车辆离开时间段的差异性

针对开始随机生成车辆的过程, 会随机生成车辆的到达时间、离开时间, 以及期望电荷, 但对三种模型的充电结束时段的规定有所差异, 连续充电模式直接以电动汽车取车时间为依据; 在不连续充电模式中, 根据生成的期望电荷, 转换成相应的时间段, 与到达时间和离开时间的时间段相比, 若期望电荷

对应的时间段比较小, 直接按照期望电荷对应的时间段为准开始充电, 与之对应, 在即充即走模式中, 只考虑期望电荷而不考虑到达时间和离开时间的时间段。

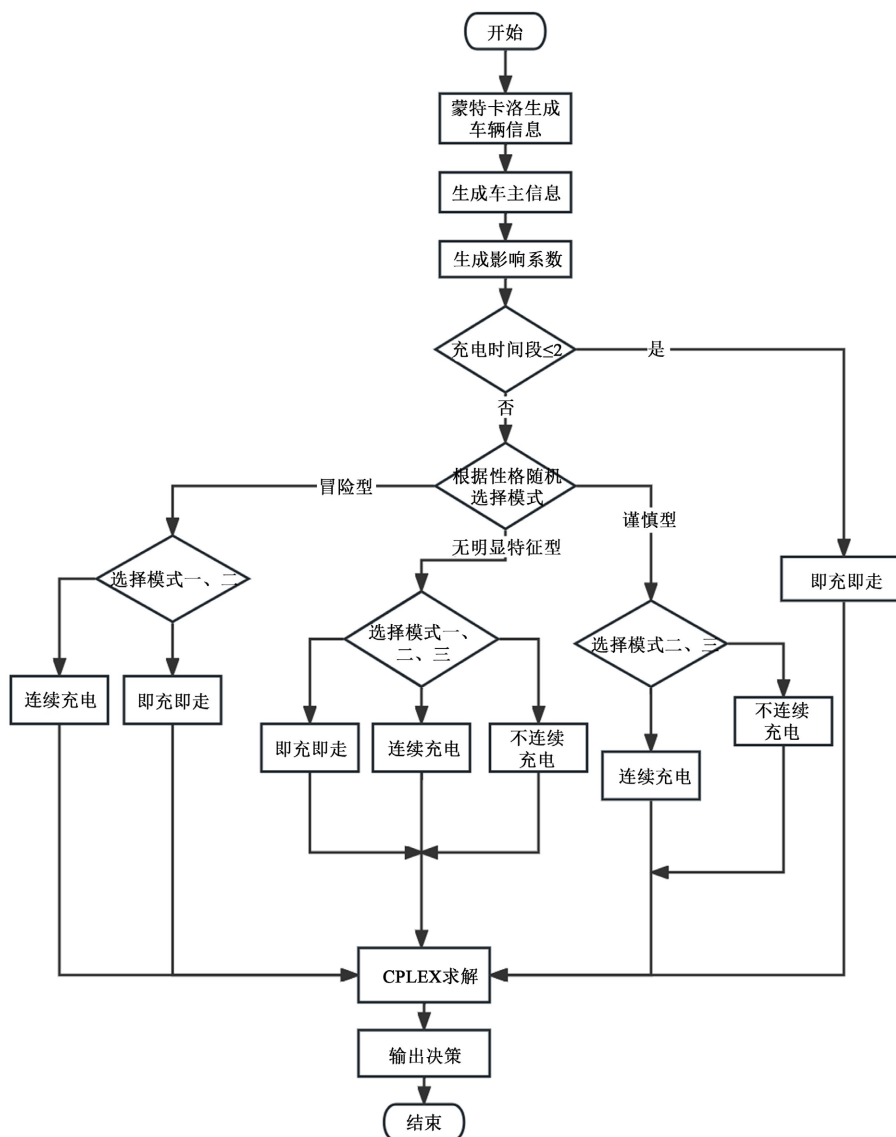


Figure 9. The process of model solving  
图 9. 模型求解流程

#### 4.1.2. 充电供应商利润形式的简化

充电商利润由购电成本和向用户收取的服务费两方面构成, 其中购电成本可由不同省市的政策给出相对统一的标准, 但服务费的收取要考虑市场竞争、充电行情等多种因素, 使得充电服务商的获利情况具有不确定性, 因此本文为简化研究, 在设置目标函数时只考虑充电商的成本而不考虑其收益特征。

#### 4.2. 参数设置

模拟仿真的部分数据设定思路基于参考文献[14]。本案例模拟实际小区充电情景, 设置充电桩共 20 台, 待充电的 EV 共 300 辆; 根据市面上的常见产品, 将充电桩的充电功率设置为 3 kW, 变压器功率 5000

kW; 每辆 EV 的电池总容量均为 43 kW·h, EV 每 100 公里耗电量为 14 kW·h, 每台 EV 满电电量所需时段个数  $h$  为 2。居民用户到达时间具有正态分布的特性, 并根据实际情况设置不同时间分布的概率, 例如晚 7 点左右一般为一天中的充电高峰期; 充电等待时间根据实际调查采用  $U(5, 10)$  的均匀分布; 荷电状态根据其随机性设定其具有正态分布的特性。EV 充电需求详细信息设定见表 3:

**Table 3.** Electric vehicle charging demand information setting

**表 3.** 电动汽车充电需求信息设定

到达时间分布	到达概率	充电等待时间分布	初始荷电状态 $C_{n0}$ 分布	离开荷电状态 $C_{n1}$ 分布
$N(2, 0.5^2)$	0.1	$U(5, 10)$	$N(0.4, 0.1^2)$ 且 $0 \leq C_{n0} \leq 0.7$	$N(0.9, 0.1^2)$ 且 $0.8 \leq C_{n1} \leq 1$
$N(9, 0.5^2)$	0.1			
$N(12, 0.5^2)$	0.1			
$N(19, 0.5^2)$	0.3			

求解前采用蒙特卡洛模拟法对表 3 种所设定信息进行数据生成, 分时电价等信息已在前文给出, 带入模型进行求解。

### 4.3. 不同激励政策对优化结果的影响

为了验证不同模式下的充电效果以及车主意愿的作用效果, 利用本文所提出的主从博弈整数规划模型, 先在不考虑车主意愿的情况, 对三种模式的充电供应商成本进行比较, 随即加入车主意愿的因素, 模拟得到包括考虑车主意愿的混合模式在内的共 4 种情形的电量差值与负荷情况。本文所采用的求解方法基于启发式算法中的贪心算法, 目的是通过遍历寻找局部最优解, 首先将用户信息全部输入, 再求解主从博弈模型。

#### 1) 充电供应商成本

EV 在不同充电策略下的充电供应商成本如表 4 所示。在应用贪心算法求解供电商购电成本时, 将每一辆 EV 在每台充电机上进行遍历并记录结果, 先求解出博弈主体目标函数的初步最优解, 再作为约束条件带入博弈主体模型中, 此时博弈主体得到的最优解继续作为博弈主体的约束条件, 重复此过程直到得到均衡下最佳的成本, 得到的结果符合充电商以用户需求至上的原则, 具有合理性。采用该方法对三种充电模式分别求解, 可以发现, 在分时电价的应用场景中, 首先在总成本方面, 相比于模式一和模式二, 采用模式三不连续充电模式的每天充电商购电的总成本会明显下降, 在同等条件下应当优先选择该模式。

**Table 4.** Comparison of total cost of different models

**表 4.** 不同模式总成本对比

模式	模式一	模式二	模式三
总成本(单位: 元)	1110.1	1114.7	1047.4

另一方面, 充电成本随着充电时间的增加不断累积, 使得充电成本的高低与充电时间段的长短形成配比, 遵循用电成本的自然规律, 即充电成本的中高段对应充电时长的中长段, 充电成本相对较低的时段则配比充电时长的短时段。基于此规律, 由图 10 可以得出: 在中长时间段(即成本中高段)内, 连续充

电与不连续充电的充电成本低于即充即走充电成本的特征表现得尤为明显；但是在短时间充电，三者成本区分度不高，甚至一些情况下连续充电与不连续充电成本高于即充即走充电成本。

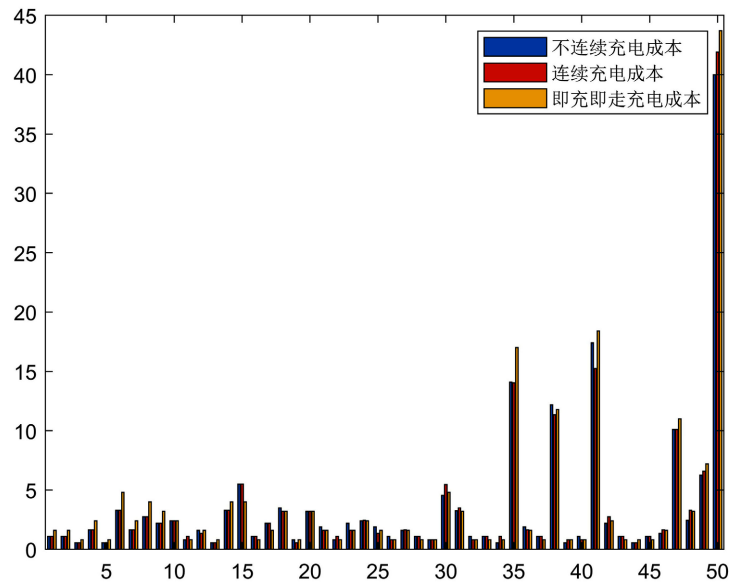


Figure 10. Comparison of charging costs of the top 50 vehicles

图 10. 前 50 辆车充电成本对比

## 2) 用户电量差值

用户电量差值作为博弈从体的目标函数，采用贪心算法求解的思路与充电供应商成本的求解类似，依据规则选出能够使得第  $n$  辆车电量差值最小的充电机  $m$ ，再经历主从博弈过程求出用户电量差值的最优解。四种情形下的电量差值对比如表 5 所示，从仿真结果可以看出，即充即走、连续充电与不连续充电的电量差值依次递减，同时考虑车主意愿的充电模式具有降低电量差值的功效，更好的服务了居民用户。

Table 5. Comparison of difference value between different modes

表 5. 不同模式电量差值对比

模式	模式一	模式二	模式三	考虑车主意愿的混合模式
电量差值(单位: kW·h)	56P	50P	48P	45P

注：P 为每台充电机的充电功率。

## 3) 充电负荷情况

负荷情况在博弈主体和从体模型中都作为重要的元素，调用 CPLEX 求解，得到充电机  $m$  在加入第  $n$  辆电动汽车后充电负荷增加量，遍历结束后记录不同时间段内每种模式的最优负荷情况。图 11~13 展示了三种模式以及考虑车主意愿的混合模式充电负荷的对比，按照模拟生成的数据特点，各模式在一天中的变化趋势相同，因此我们着重关注一天当中的波峰与波谷的负荷程度：

① 图 12 为波峰时的负荷情况，原始负荷曲线是在没有电荷消耗的情况下的用电曲线。可以发现在一天的用电波峰时段中，与模式二和模式三相比，在波峰时模式一所消耗的电荷较多，表明在充电高峰时段采用有序充电模式会减轻电网的负担，在实际应用场景中能够发挥其优势减轻波峰时的充电压力，避免出现小区居民用电负荷过载的情况。

② 图 13 为在波谷时的负荷情况, 此时模式三消耗电荷情况则明显少于模式一与模式二, 表明在小区居民在用电低谷期, 无序充电耗电少, 有序充电则会选择提高总负荷, 与波峰情况的电荷消耗形成互补, 平衡电网, 更高效地利用充电桩。

③ 观察考虑车主意愿的混合模式的负荷曲线, 可以得出考虑车主意愿总体上能够起到削峰填谷的作用: 在波峰时的耗电量相对低于耗电最多的模式一, 同样在波谷时的耗电量高于耗电最少的模式一, 相当于将三种充电模式进行中和减小峰谷差, 使电动汽车在充电过程中实现由高峰充电低谷放电转向高峰放电低谷充电, 在满足用户意愿的前提下实现整体电网平稳运行。

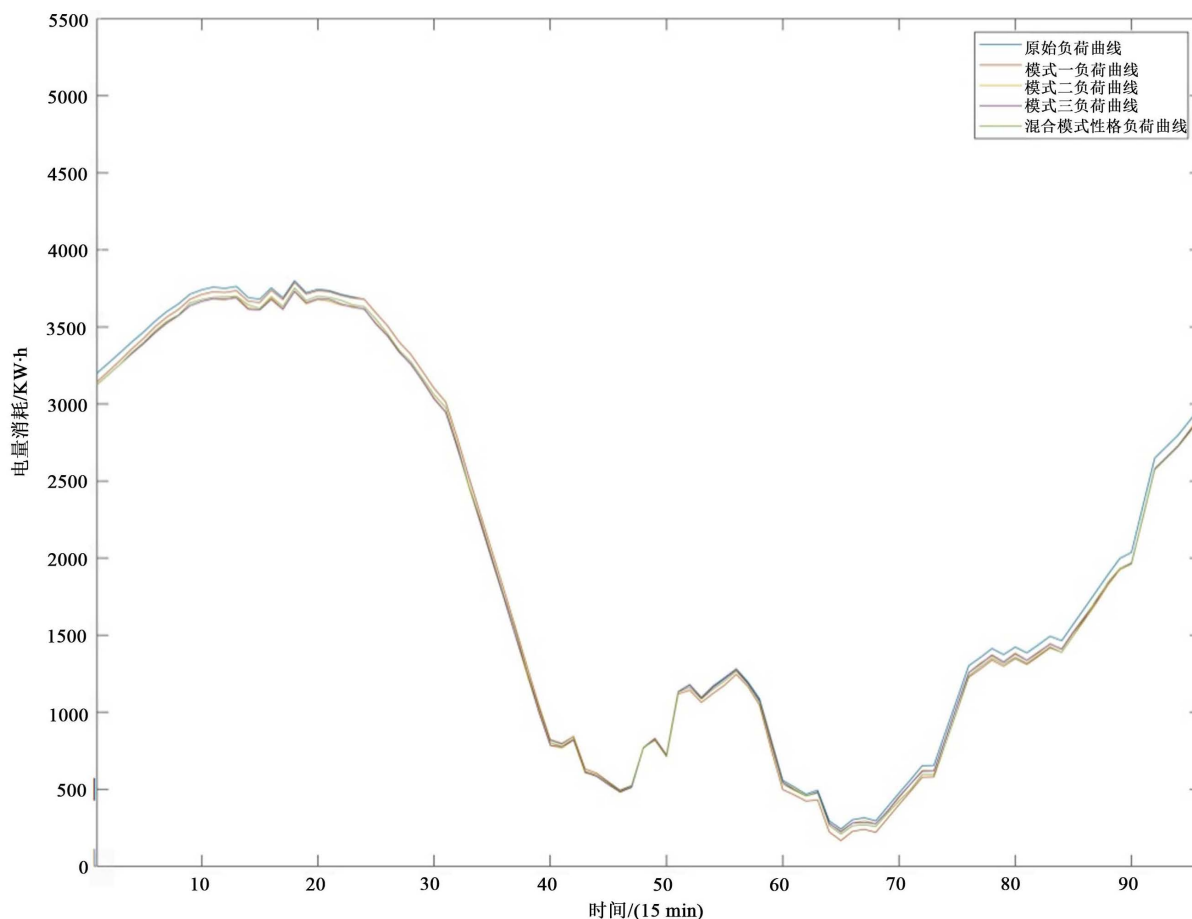


Figure 11. Comparison of charging load of each mode throughout the day

图 11. 各模式全天充电负荷对比

## 5. 结论

随着 EV 消费市场的不断扩大, 用户对充电模式的追求也更加多元化。本文基于用户特征对小区居民电动汽车充电方法进行探究, 将居民用户划分为三种类型, 并基于主从博弈思想建立了混合整数规划模型, 得到无序充电中的即充即走模式与有序充电中不连续充电与连续充电的效果, 基于对比算例可得到如下结论:

1) 在小区负荷的优化方面, 有序充电优化系统的负荷能够适应波峰波谷的情形, 在波峰时减轻小区总体充电压力, 在波谷时则相对提高负荷来提高充电桩的利用率, 实现充电资源充分利用, 降低用户的电量差值;

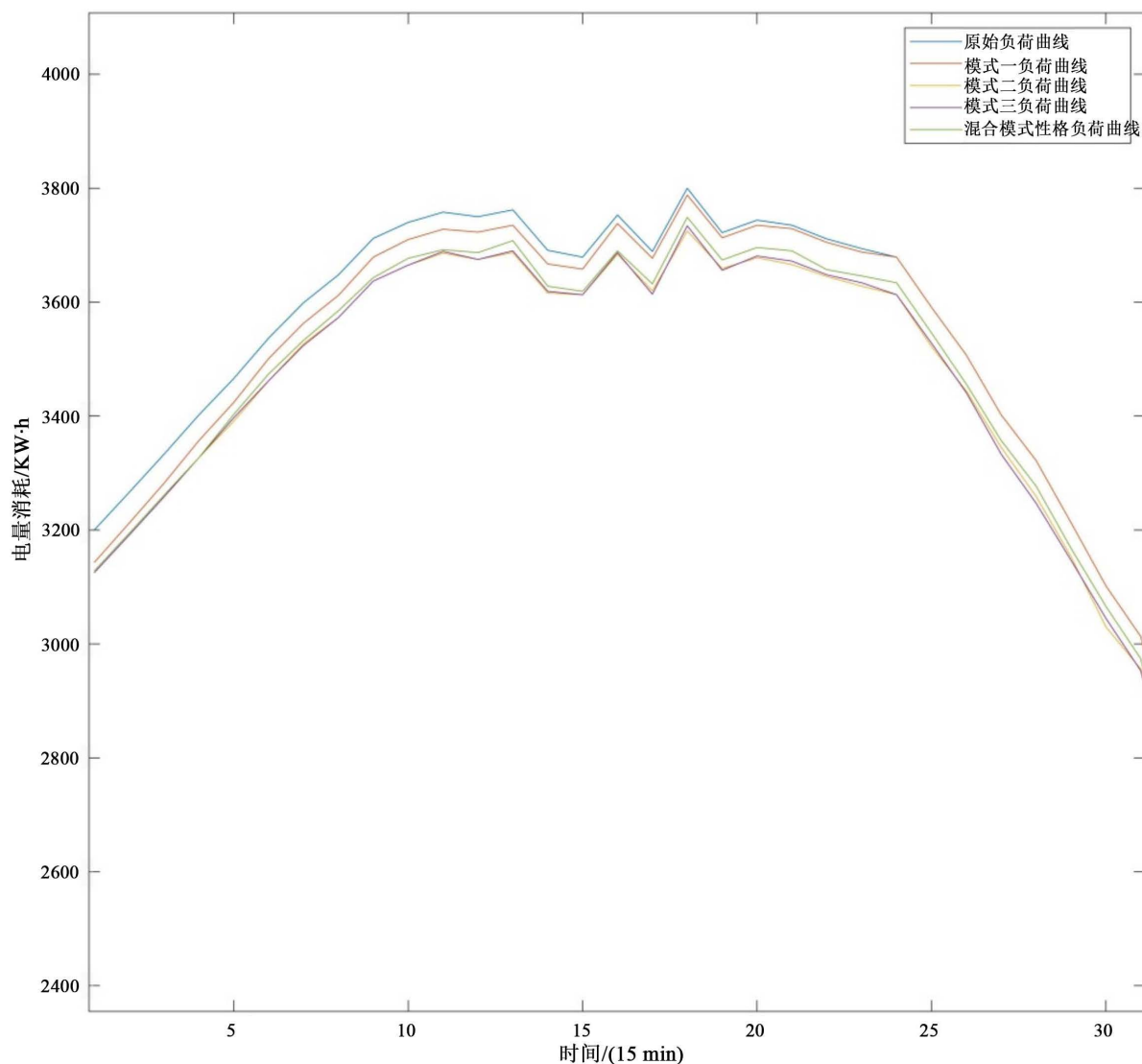


Figure 12. The details of the crest

图 12. 波峰细节

2) 有序充电实现了对充电成本的节约, 从总成本的角度来看, 采用有序充电中不连续充电这一模式能够达到节约成本的最佳效果, 但这种效果并不是绝对的, 还会受充电时长的制约。将总成本拆分为不同时段来看, 有序充电中连续与不连续的充电模式在中长时段都能够更好地达到降成本这一目的, 但在短时间内不适用该策略, 甚至会出现与预期相反的结果。在绝大多数的充电情景中, 应用有序充电都可以作为充电供应商的最佳选择, 除一些短时间充电的特殊需求该结论未必成立, 说明在实际的应用场景中, 决策未必与微电网预期相符, 应当充分考虑小区总体充电情况来做出合理的决策;

3) 本文所提出的综合考虑车主意愿的优化充电系统能够有效达到“削峰填谷”的效果, 并显著降低用户电量峰谷差, 能够充分调动小区居民充电积极性, 在平衡电网的应用中可适当扩大使用范围;

4) 有序充电中不连续充电策略的选择有利有弊。实现效用的同时也会承担充电中断引发的电池系统的损耗。而且长时间的插枪停放, 电池电量的自然消耗可能触发充电模式的频发连接与关闭, 导致电池热失控[15], 在应用过程中要及时防范安全隐患。

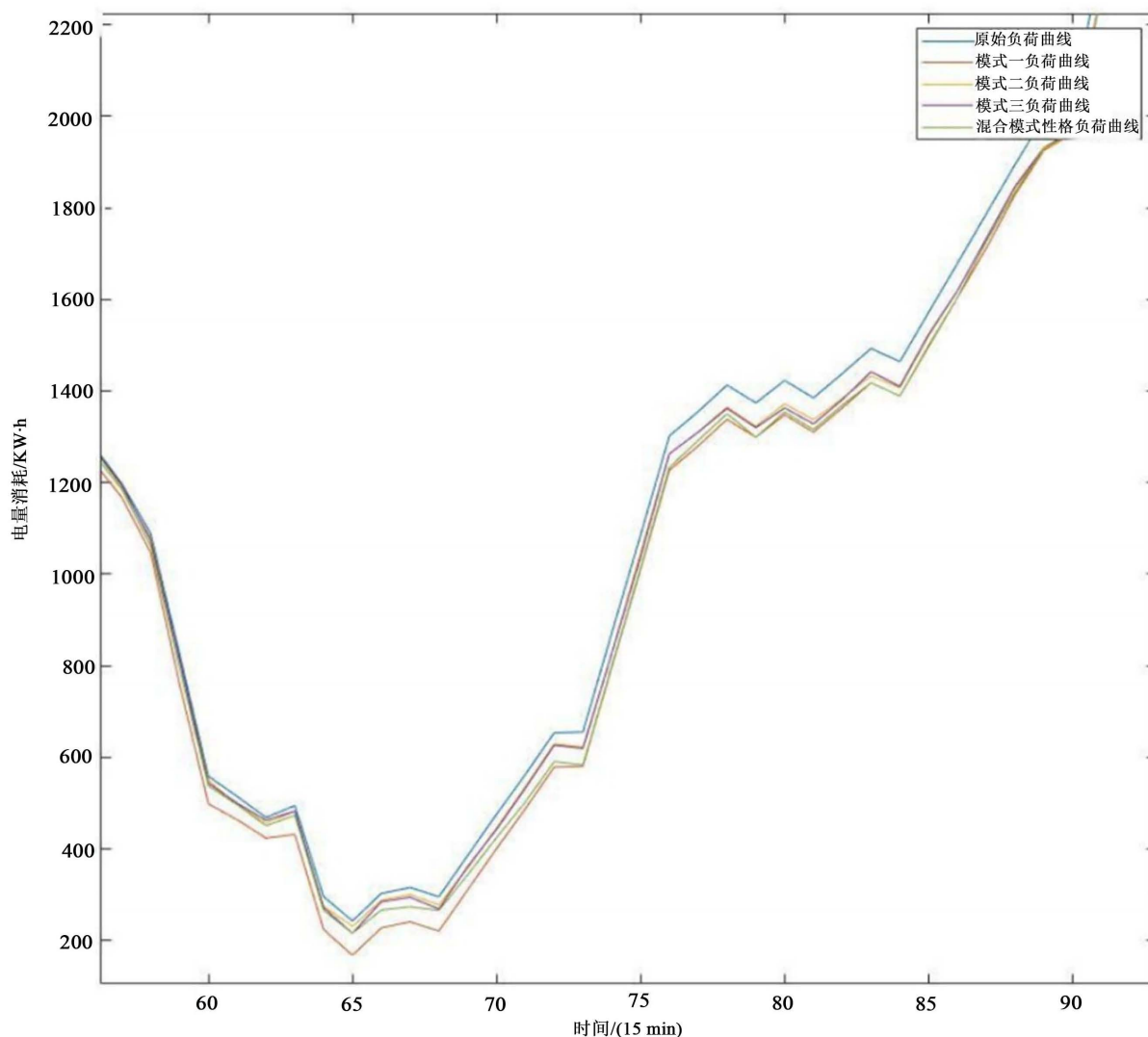


Figure 13. The details of the troughs

图 13. 波谷细节

在绿色出行方式成为主流的今天, 需要更多有实际意义的相关模型为现实应用提供理论依据, 基于此, 本文从多模型角度对比分析了不同充电策略的应用场景, 意图实现充电供应商与小区居民用户的互惠共赢。

## 参考文献

- [1] 韩沐枫. 计及需求响应的微电网多时间尺度调度仿真[J]. 计算机与现代化, 2023(3): 102-106.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 2022 年我国充电桩数量同比增长近 100% [EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2023-02/14/content\\_5741406.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2023-02/14/content_5741406.htm), 2023-02-14.
- [3] 崔金栋, 刘珊珊. 网格分时电价下电动汽车有序充电策略[J]. 农村电气化, 2022(12): 58-65. <https://doi.org/10.13882/j.cnki.ncdqh.2022.12.015>
- [4] 包宁宁, 刘晓波. 分时电价下电动汽车有序充放电优化策略[J]. 电力科学与工程, 2023, 39(2): 14-20.
- [5] 邓慧琼, 张晓飞, 曾凡淦, 等. 动态分时电价机制下的电动汽车充放电调度策略研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(3): 59-66, 78.



- [6] 张高山, 江御龙, 刘永春. 考虑充电桩最优效率的电动汽车有序充电模型[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(1): 64-68. <https://doi.org/10.14016/j.cnki.1001-9227.2023.01.064>
- [7] 张艳娟. 电动汽车充电负荷预测及有序充电控制策略研究[J]. 电工技术, 2023(2): 14-16, 20. <https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2023.02.005>
- [8] 李海斌, 李正明, 汪洋. 居民小区电动汽车有序充电策略研究[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(7): 11-15, 57. <https://doi.org/10.19557/j.cnki.1001-9944.2021.07.003>
- [9] 仲志强, 赵翔, 蔡华, 等. 住宅小区规模化电动汽车有序充电策略及系统实现[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(3): 118-122. <https://doi.org/10.19652/j.cnki.femt.2002328>
- [10] 魏振华, 王黎黎, 郑亚锋, 等. 基于主从博弈的含电动汽车综合能源系统运行策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12417-12423.
- [11] 刘标, 李琳, 周毅, 等. 湖南分时电价政策及其对用户影响分析[J]. 大众用电, 2023, 38(1): 22-23.
- [12] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 罗卓伟, 占恺峤, 石恒. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 38-43.
- [13] 聂琳真, 管家意, 卢焯华, 等. 基于模糊逻辑的高速公路微观换道行为[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(3): 424-432.
- [14] 王晓琨, 翟桥柱, 白婕. 基于混合整数规划的电动汽车有序充电方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 70-82, 102. <https://doi.org/10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.010>
- [15] 太平洋汽车. 新能源汽车充电中途断电对电池有影响吗[EB/OL]. <https://www.pcauto.com.cn/jxwd/2814/28141660.html>, 2022-01-18.