

# 双碳目标下考虑居民不同意愿下充电的优化调度策略

史亚峰<sup>1\*</sup>, 党亚峥<sup>1</sup>, 薛中会<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学管理学院, 上海

<sup>2</sup>上海出版印刷高等专科学校管理学院, 上海

收稿日期: 2024年4月9日; 录用日期: 2024年5月11日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

针对电动汽车(electrical vehicle, EV)在居民小区无序充电对电网系统容易产生严重隐患等问题, 本文提出了考虑车主的不同意愿和性格的优化调度策略。研究电动汽车用户意愿具有多样性和不确定性的特点, 考虑到居民用户不同意愿以及用户的性格因素制定的动态分时电价, 引导EV在多模式电价中做出选择。在满足用户意愿的前提下, 进行优化调度, 使其充电成本最低化。采用遗传算法(GA)求解优化模型, 获得最优多模式动态电价和EV充放电策略。仿真结果表明了不仅可以有效地减小电网的峰谷差, 还可以降低电动汽车用户的充电费用, 充分验证了该策略的有效性与合理性。

## 关键词

有序充电, 动态电价, 蒙特卡洛, 性格因子, 电动汽车, 意愿指数

# The Optimal Charging Scheduling Strategy Considering Different Wills of Residents under the Dual Carbon Target

Yafeng Shi<sup>1\*</sup>, Yazheng Dang<sup>1</sup>, Zhonghui Xue<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>School of Management, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai

Received: Apr. 9<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 11<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

In order to solve the problem that electric vehicle (EV) unordered charging in residential areas is

\*第一作者。

easy to cause serious hidden dangers to the power grid system, this paper proposes an optimal scheduling strategy that takes into account the different wishes and personalities of owners. This paper studies the diversity and uncertainty of electric vehicle users' wishes, and takes into account the different wishes of resident users and the personality factors of users to make a dynamic TOU price to guide EV to make a choice among multi-mode electricity prices. Under the premise of meeting the wishes of users, the optimal scheduling is carried out to minimize the charging cost. Genetic algorithm (GA) was used to solve the optimization model, and the optimal multi-mode dynamic electricity price and EV charging and discharging strategy were obtained. The simulation results show that not only the peak-valley difference of the power grid can be effectively reduced, but also the charging cost of EV users can be reduced, which fully verifies the effectiveness and rationality of the strategy.

## Keywords

Orderly Charging, Dynamic Electricity Price, Monte Carlo, Personality Factors, Electric Vehicles, Willingness Index

Copyright © 2024 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

随着全球对环境保护的日益重视, 电动汽车作为一种环保、节能的交通方式, 逐渐成为人们的选择。在中国, 政府也加大了对新能源汽车的推广力度, 电动汽车的普及率也在不断提高。各个城市都在不断的为新能源汽车的发展提供强有力的支持, 大量的充电桩也随之建立起来。但是, 鉴于城市的结构复杂, 还不能有效解决电动汽车(Electric Vehicle, EV)的充电问题[1]。然而大量电动汽车无序接入配电网之后, 会对配电网的安全稳定运行带来巨大的挑战, 尤其在密集的城区, 会直接造成配电网负荷峰谷差加大、变压器功率过载等影响, 如何缓解电动汽车高速增长对配电网安全运行的影响是目前亟需解决的关键问题。

电动汽车充电设备作为一种非线性负荷, 接入电网后会产生谐波电流, 对供电系统产生谐波污染, 影响电网的安全运行[2] [3]。同时, EV 接入电网不受时间和空间的限制, 具有不确定性, 离开电网也具有一定的随机性, 如果不进行准确的预测和控制, 将会增加电网的不稳定性, 影响配电网的运行。文献[4]对电动汽车的无序充电行为进行研究, 同时验证了电动汽车有序充电对配电网经济、安全稳定运行的影响。

所以, 对 EV 用户充电行为的研究十分必要, 当前关于电动汽车有序充电的研究很多[4]。

国内外主流方法都是使用蒙特卡洛方法对电动汽车使用出行需求进行仿真模拟, 再通过有序充电与无序充电进行对比, 验证其策略有削峰填谷的效果。文献[5]利用动态电价对 EV 的充电行为进行引导, 建立了以电网负荷峰谷差最小所对应的峰谷电价时段为目标的优化模型。文献[6]提出以电网负荷方差评估调峰水平, 考虑用户充电等待时间, 建立售电站收益 - 电动汽车用户满意度博弈充电模型。然后, 利用粒子群优化算法求解双方最优策略。文献[7]基于分时电价, 综合考虑电网和用户两个方面的利益, 建立双目标优化的数学模型, 优化了充电的连续性, 可以有效地防止负荷突变, 起到保护充电设施的作用。文献[8]以电动汽车充放电电价、电动汽车充放电状态和充放电功率为决策变量, 构建了以电动汽车充放电成本最小、电动汽车接入造成的网络损耗最小和节点电压偏差最小为优化目标的电动汽车充放电调度数学模型。文献[9]考虑了电动汽车充电需求的紧迫性, 根据充电需求的紧迫性为电动汽车选择最佳充电

模式。文献[10]将电网总功率负荷的最小方差和最小调度成本作为目标函数,采用多目标粒子群算法进行求解。文献[11][12][13]以减小电网总的负荷波动作为目标函数,采用峰谷分时电价建立有序充电模型。上述文献以电动汽车充放电特性构建优化模型,对电动汽车用户与电网之间的利益关系研究较少。

目前大多数研究的主要是以电网侧为主,针对电动汽车充电负荷对整体微电网侧的正常运行的影响,通过有序充电调度来进行峰谷平衡,很少考虑电动汽车车主的主观意愿,从而忽略了车主的个人选择。基于上述分析,本文提出了一种电动汽车有序充电调度策略,并构建考虑电动其次用户意愿的动态分时电价行为,旨在量化居民满意度,并充分考虑电动汽车用户的调度意愿和与电网的互动能力,引导电动汽车的有序充电行为。该策略致力于将车主的意愿纳入调度过程中,并定量评估居民的满意度。通过与电动汽车车主的积极互动,调度系统可以了解他们的个人偏好和需求。此外,该策略还考虑电动汽车与电网的互动能力。通过监测电网负载、能源价格和供需情况,调度系统可以合理安排电动汽车的充电时间和模式,以避免电网过载并降低能源成本。同时,系统可以根据电动汽车的可用性和电池状态进行动态调整,以确保充电行为的高效性和可靠性。基于这些信息,系统可以智能地协调电动汽车的充电计划,以满足车主的意愿,并最大程度地提高整体系统的性能和居民的满意度。

该方法首先利用遗传算法(GA)对每个时段的充电负荷计划进行优化;然后在充电计划的基础上,基于用户意愿指标和车用电池的荷电量确定每辆电动汽车的充电优先级,并为每辆电动汽车建立动态顺序电价。为了充分考虑用户参与有序充电的意愿,本文主要量化了车主的性格因子和意愿指数,根据车主结合自己的实际情况自我设置,极大地考虑了用户车主的自身意愿。

## 2. 电动汽车充电负荷概率模型

### 2.1. 分时电价

分时电价是一种根据用电时间不同而定价不同的电力计费方式。它的实质是通过在不同时间段设置不同的电价来引导用户在低谷期间使用电力,从而平衡用电峰谷差异,缓解电力供需矛盾,提高电网利用效率,减少电力损耗。引入分时电价后,在保证小区变压器不过载的前提下,尽量安排用户在低谷时段充电,制定的充电分时电价能够有效反映电网负荷波动,即保证了用户充电的经济性,又缩小了电网的峰谷差。

### 2.2. EV 用户出行行为习惯

电动汽车充电负荷时空随机性强,精准建模难度较大,针对特定场景,结合用户的充电行为习惯进行概率建模。当前电动汽车充电方式主要有四种:常规充电、快速充电、机械充电和无线充电[14]。本文研究针对统一家用电动汽车,采用常规充电方式进行充电,以满足不同车型和充电环境下的充电需求。表征住宅小区住户出行行为习惯的相关参数,如返回时刻  $t$ 、日行驶里程  $d$  根据 2009 年美国交通部统计的家庭车辆行驶调查数据(national household travel survey, NHTS),一天中有 14% 的家用车不被使用,有 43.5% 的私家车日行驶里程在 32 km 以内,有 83.7% 的私家车日行驶里程在 97 km 以内[15]。将统计数据归一化处理,采用极大似然参数估计方法将车辆日行驶里程近似为对数正态分布,其概率密度函数为:

$$f_d = \frac{1}{d\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(d-u))^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中:  $d$  为日行驶里程,期望值  $\mu=3.2$ ; 标准差  $\sigma=0.88$ 。

根据 NHTS,使用最大似然估计方法,用户汽车每天最后一次返回时间的概率密度可以描述为:

$$f_s(T_{re}) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(x+24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & 0 \leq x \leq \mu_s - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(x-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & \mu_s - 12 \leq x \leq 24 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\mu_s$  是期望值， $\mu_s = 17.47$ ； $\sigma_s$  是标准差， $\sigma_s = 3.41$ 。

### 2.3. EV 的充电时长

EV 的 SOC (State of Charge)的计算方法如下：

$$S_{end,i} = S_{star,i} - \frac{l_i}{l_m} \quad (3)$$

其中， $S_{star,i}$  表示第  $i$  辆 EV 离家开始的 SOC， $S_{end,i}$  为第  $i$  辆 EV 返家的 SOC； $l_i$  和  $l_m$  分别表示第  $i$  天行驶里程和 EV 的最大行驶里程。

为了便于仿真电动汽车充电过程，单辆电动汽车的充电时长可按式(4)计算：

$$T_{or,i} = (S_{e,i} - S_{end,i}) \times \frac{B_i}{P_{evl}\eta} \quad (4)$$

其中， $S_{e,i}$  是 EV 用户设置的预期 SOC；以及  $B_i$ 、 $P_{evl}$  和  $\eta$  分别为车载电池容量、单量电动汽车的额定充电功率及其充电效率。

### 2.4. 意愿指数与动态顺序收费价格

#### 2.4.1. 性格因子

车主的性格对参与有序充电的意愿具有模糊性，本文对车主有序充电的意愿进行了量化，使用 Big Five 人格模型，其中包括以下五个特征：外向性、神经质、开放性、宜人性和尽责性。以此为基点，将车主的五种性格激进、进步、保守、中立、温和，用从 1 到 5 的一组有理数来进行量化，用性格因子  $f_{ea}$  表示。为了细化各个车主不同的差异性，对参数  $f_{ea}$  进行调整：

$$\bar{f}_{ea,l} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ea,i}}{n}, \quad 1 \leq f_{ea,i} \leq 5 \quad (5)$$

$$f_{ea} = \begin{cases} f_{ea,i}, & f_{ea,i} = N^+ \\ \left\{ f_{ea,i}, f_{ea,l}^-, f_{ea,i} + \frac{|f_{ea,i} - \bar{f}_{ea,l}|}{10} \right\}, & f_{ea,i} < \bar{f}_{ea,l} \\ \left\{ f_{ea,i}, f_{ea,i} - \frac{|f_{ea,i} - \bar{f}_{ea,l}|}{10}, \bar{f}_{ea,l} + \frac{1}{10} \right\}, & f_{ea,i} \geq \bar{f}_{ea,l} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $n$  是居民小区电动车参与小程序性格调查的人数。 $f_{ea,i}$  表示第  $i$  位车主固的一个量化性格因子。 $\bar{f}_{ea,l}$  是截止第  $i$  位车主填完问卷后所有参与车主的一个平均量化性格因子。

$f_{ea}$  不为整数时，任意取集合中三个数中的任何一个数，经过细化差分可以使生成的数据具有多样性，更具有实际意义。

#### 2.4.2. 意愿指数

现有的电动汽车有序充电研究仅考虑用户是否参与调度：按照调度安排加入有序充电行列，或在电动

汽车到达时立即充电。这种方法没有充分考虑用户的主观意图。因此,本文建议量化用户参与有序充电计划的意愿。我们定义了意愿指数表示电动汽车用户参与有序充电的意愿强度。意愿指数越大,电动汽车用户参与有序充电的意愿越强。我们将意愿指数与电价挂钩。意愿指数越大,相应的充电价格也会越低,但充电站的EV组中的充电优先级会变低。用低电价来进行优先充电的调控,意愿指数的制定如下:

$$\xi_i = \frac{S_{i,t}}{\max(S_{i,t})} + \xi_0 + f_{ea} \quad (7)$$

式中,  $S_{i,t}$  是第  $i$  辆在时间  $t$  充电的电动汽车的剩余电量,  $\xi_0$  和  $\xi_i$  分别是用户设置的意愿指数和作为确定收费优先级的主要依据的综合意愿指数。

基于意愿指数和现有的充电电价时间,每个时段内每个电动汽车的充电价格动态变化如下:

$$p_{i,t} = \begin{cases} p_{0,t} + \{(\xi_{ave,t} - \xi_i)p_{0,t} + p_0 f_{ea}\} / 10 & (\xi_i \leq \xi_{ave,t}) \\ p_{0,t} + \{(\xi_i - \xi_{ave,t})p'_{0,t} + p_0 f_{ea}\} / 10 & (\xi_i \geq \xi_{ave,t}) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $p_{i,t}$  是该电动汽车在  $t$  期的充电价格;如下表所示,  $p_{0,t}$  和  $p'_{0,t}$  分别为固定电价和  $t$  期从电网购买的电价;  $\xi_i$  和  $\xi_{ave,t}$  分别是该EV的意愿指数和  $t$  期的平均意愿指数,  $f_{ea}$  性格因子是从1到5的一组整数。

用户意愿指数同步至云平台。EV在停车后等待充电。在每一个新的时段,控制中心根据充电计划和该时段内的EV用户充电意愿指数和充电需求,对EV组内各车辆的优先级进行排序,并启动选择性充电。在此期间未完成充电的电动汽车将归入下一期间的充电顺序,以此类推。

### 3. 有序充电调度策略

#### 3.1. 充电调度框架

在电动汽车充电调度系统中,电力公司的主要职责是根据配电网历史基础负荷曲线、电动汽车充电负荷以及电网分时电价等因素,制定次日各时段的整体充电计划。随后,该充电计划将被下发给充电服务商。整体充电计划将一天分为96个时段。充电服务商将充电计划发送到各个充电站或社区。每个充电站或社区将收集相应的电动汽车状态,并为用户提供参考的意愿指标。当电动汽车用户停车后,他们可以在APP上设置所需的取车时间和电量需求。云平台通过大数据计算迅速提供用户参考的意愿指数和预期成本。

为便于对充电负荷建模计算,本文做出以下假设:

- 1) 住户返回小区后立即为电动汽车充电;
- 2) 用户起始充电时刻概率分布和电动汽车行驶里程概率分布相互独立;
- 3) 小区充电设施的配置与电动汽车数量相匹配,即每辆车都有一个充电桩,不存在排队充电的情况。

#### 3.2. 小区充电桩接入模式控制

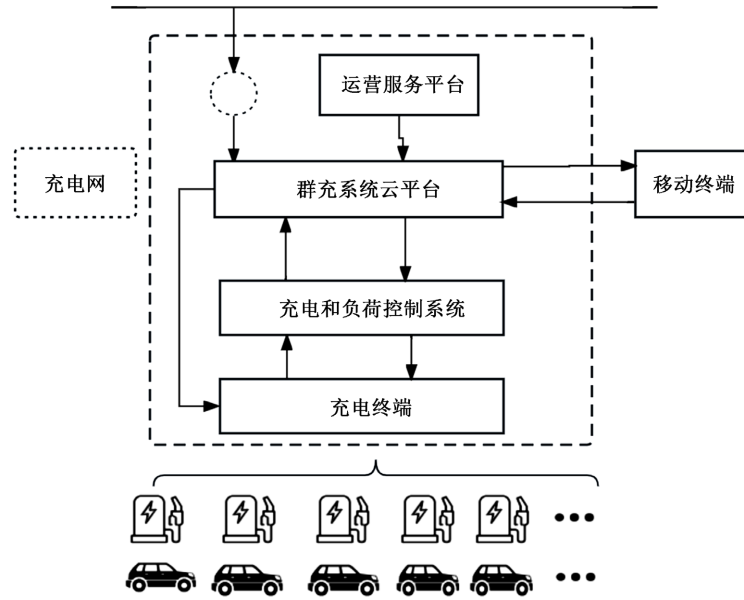
##### 3.2.1. 群管群控充电技术

群管群控是指在电动汽车群充电系统中,通过网络控制系统对充电桩进行集中管理和控制,实现多人充电桩的高效运营。它涉及对充电桩的状态、模拟量和充电过程进行监测和控制,并包括电度量功能。在群管群控模式下,充电桩的管理和控制由中心控制系统或控制层负责,通过与每个充电桩的通信进行集中管理[16]。

##### 3.2.2. 接入模式

为了有效地实现居民小区内充电桩的智能接入,采用群控群管充电的接入控制模式,如图1所示。





**Figure 1.** Schematic diagram of residential charging piles access control mode  
**图 1.** 小区充电桩接入控制模式图

群控充电技术的实现需要先建立一个网络平台，将所有充电桩连接到该平台上。通过该平台，可以对充电桩进行实时监测，并进行远程控制和管理。群控充电技术的核心在于能够实现对多个充电桩的集中管理和控制，从而提高充电桩的利用率和充电效率。具体步骤可以分为 4 步，具体可以描述为：

1) 负荷预测和充电计划生成：利用历史基础负荷曲线和电动汽车充电负荷数据，可以进行负荷预测，并根据电网分时电价等因素制定次日各时段的整体充电计划。这样可以在最大程度上平衡电力公司的供需关系，实现电网负荷的合理调配。

2) 用户意愿指标和预期成本计算：基于用户的充电意愿指标和预期成本，可以通过云平台的大数据计算快速提供用户参考的意愿指数和预期成本。这样用户可以根据自身需求和经济考量做出充电决策，实现个性化的充电服务。

3) 充电桩状态监控和故障诊断：通过群管群控模式，控制层可以实时监测充电桩的状态量和模拟量，并对充电过程进行控制和管理。同时，通过与云平台的通信，可以实现充电桩的状态监控和故障诊断，提高充电设施的可靠性和稳定性。

4) 电能最优分配和充电时间安排：调度层可以对服从调度的电动汽车进行有序充电，实现电能的最优分配。此外，还可以根据用户的预约充电需求，合理安排充电时间，避免充电桩的拥堵和排队等待情况，提高充电效率和用户体验。

### 3.3. 有序充电控制策略

基于充电站或电池的历史负载曲线和电动汽车的总体充电需求，我们可以建立充电计划，参考一天中每个时间的  $P_{ref,i}$ ，以减少峰谷差并抑制负载波动。然后将其释放到 EV 充电控制中心。当 EV 连接到充电桩时，它需要与充电桩设备交互以获取充电信息，包括当前 SOC  $S_{end,i}$  和预期 SOC  $S_{e,i}$ 、出发时间  $T_i$  和充电功率  $P_i$  等。控制中心系统给出了意愿指数参考值和预期充电电费，供用户参考。在每个时间段，基于充电负荷计划，系统根据要充电的 EV 性能指标和用户的最终意愿指数  $\xi_i$ ，对 EV 充电的优先级进行排序。具有较小的  $\xi_i$  优先收费，同时假定价格相对较高。 $\xi_i$  较大的 EV 要充电，其对应的电费较低。这样既优化了负荷调度，又兼顾了用户的个性化需求，同时降低了用户的充电成本。有序充电控制流程图如图 2 所示。

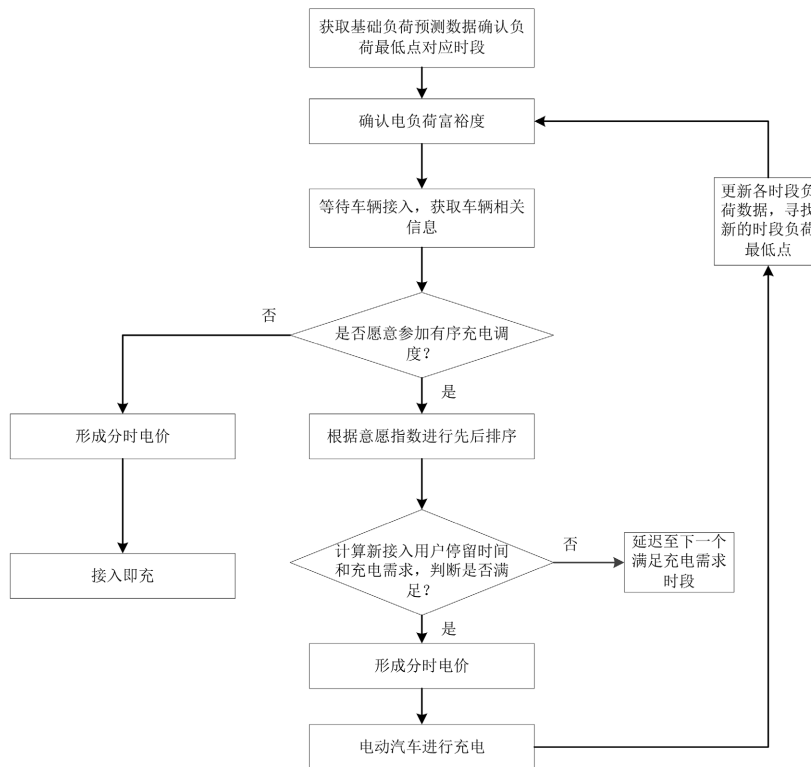


Figure 2. Flow chart of orderly charging of electric vehicles  
图 2. 电动汽车有序充电流程图

在图中,  $n_t$  为  $t$  期间处于充电状态的电动车数量;  $N$  为  $t$  期间要充电的电动车数量;  $N_t$  为充电期间允许充电的最大数量。小区第  $i$  个时段内基础负荷为  $P_i$ , 单台电动汽车功率为  $p_0$ 。用蒙特卡洛模拟得到单辆电动汽车的充电持续时间  $T_0$ , 通过寻找充电过程中总负荷最低点所在的时段  $T_{\min j}$ , 采用倒序递推原则选取电动汽车的充电开始时段(指该时段的开始时刻), 尽可能在低谷时段给电动汽车充电。

### 电动汽车充电成本目标函数

根据有序充电控制架构流程, 电动车充电的顺序和开始时间由调度中心制定的充电计划和同一时期进入充电桩的其他用户决定。在电动车开始充电的时间满足电池电量需求、取车时间要求和整体调度计划的前提下, 有序充电计划使得用户的充电成本最小。因此, 这个数学模型的目标函数如下。

$$\min F = \sum_{i=1}^{96} \sum_{t=1}^N x_{i,t} P_i p_i \Delta t \tag{9}$$

式中,  $N$  为某一时间段内某一充电站或社区的电动车数量;  $x_i(t)$  为第  $i$  电动车在  $t$  时间段内的充电状态,  $x_i(t)=1$  表示正在充电,  $x_i(t)=0$  表示不在充电。  $P_i$  是第  $i^{\text{th}}$  辆车的充电功率;  $\Delta t$  是时间间隔, 本文设定为 1 h。

### 3.4. 条件约束

- 1) 充电功率限制。确保每个 EV 在充电后达到其期望的 SOC:

$$\sum_{t=1}^T P_i x_{i,t} \Delta t = (S_{e,i} - S_{end,i}) w_i \tag{10}$$

其中,  $w_i$  为第  $i^{\text{th}}$  辆电动汽车的电池容量。

- 2) 充电时间限制。确保每个电动汽车在用户设定的充电时间之前完成充电。

$$t_{e,i} \leq T_i \tag{11}$$

其中,  $t_{e,i}$  为第  $i$  辆 EV 完全充电的时间;  $T_i$  为第  $i$  辆 EV 的期望取车时间。

3) 荷电状态约束

$$S_{star,i} \leq S_{soc,i} \leq S_{end,i} \leq S_{max} \tag{12}$$

式中:  $S_{star,i}$  是 EV 开始充电时刻的荷电状态;  $S_{soc,i}$  是 EV 充电电量;  $S_{end,i}$  是 EV 结束充电时刻的荷电状态;  $S_{max}$  为 EV 最大充电容量。

4) 进度计划约束。每个时期的电动汽车充电总负荷不超过该时期的充电计划。然而, 如果某些时段的充电计划不能满足用户的充电需求, 则充电计划  $P_{ref}(t)$  将在相应时段内增加 1%, 直到满足需求。

$$\sum_{i=1}^n x_i P_i \leq P_{ref,t} \tag{13}$$

其中,  $n_t$  为  $t$  时段内充电的电动汽车数量;  $P_{ref,t}$  为时段充电负荷计划。

3.5. 算法求解

本节采用改进的遗传算法对模型进行求解, 改进的遗传算法包含三个求解步骤, 分别为选择算子、交叉算子以及变异算子, 具体的算法求解流程如下。

1) 选择算子

选择操作是指根据遗传算子, 在种群中进行选择后, 保留个体适应度值较高的个体, 淘汰掉个体适应度值较低的个体, 保持种群规模不变并生成新一代种群的操作, 具体流程如图 3 所示。

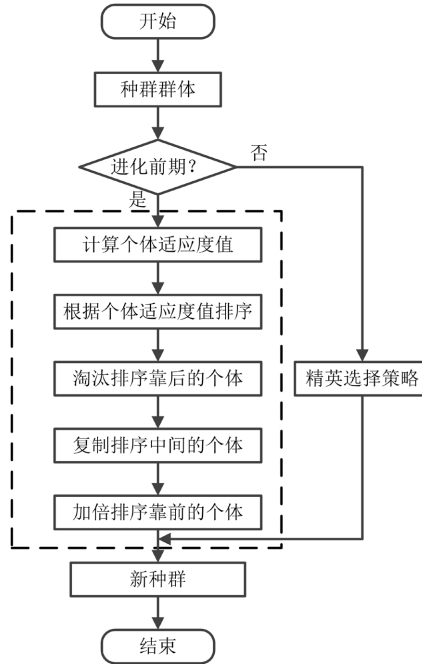


Figure 3. Select the operator flow chart  
图 3. 选择算子流程图

2) 交叉算子

交叉操作通过对当前种群中两个个体的部分基因进行交叉互换, 在新一代中生成两个新个体, 是实现算法寻优的重要步骤, 具体流程如图 4 所示。



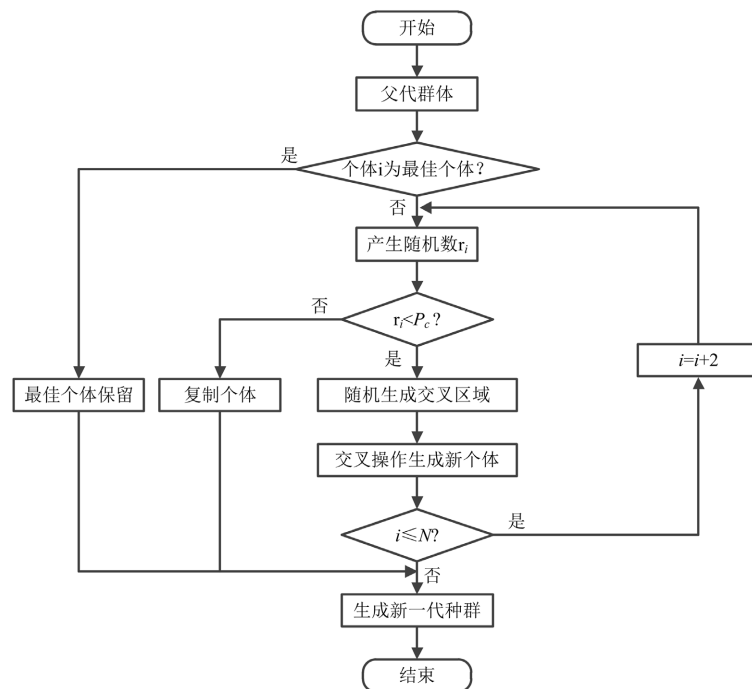


Figure 4. Flow chart of the cross-operator

图 4. 交叉算子流程图

## 3) 变异算子

变异操作是指根据变异算子，令个体的某一位基因值发生突变，从而在新一代种群中产生新个体的操作，具体流程如图 5 所示。

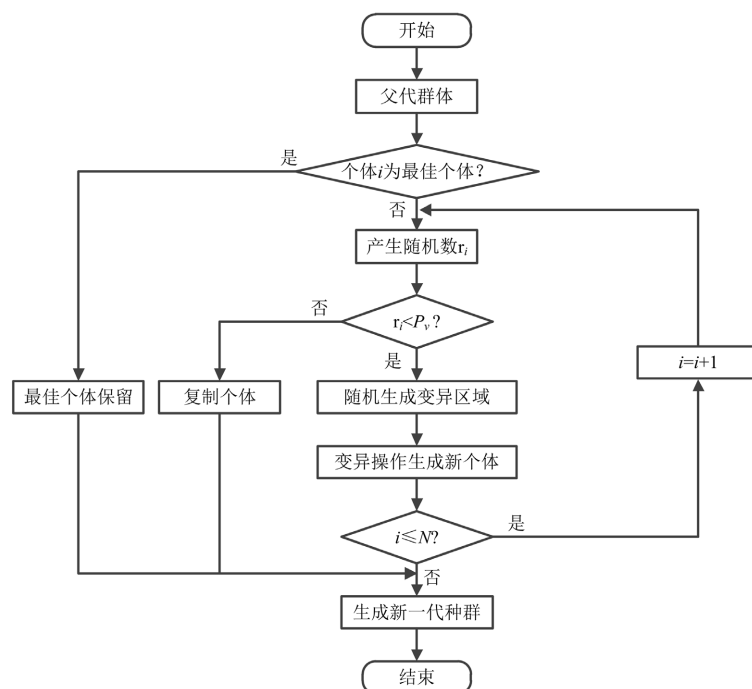


Figure 5. Flow chart of the variation operator

图 5. 变异算子流程图

### 3.6. 求解流程

基于上述模型，本节给出所提模型及方法的求解流程，具体如下：

- 步骤 1：构建电动汽车充电特性模型，采用蒙特卡洛模拟法获得电动汽车初始充电需求；
- 步骤 2：在考虑电动汽车用户用电的基础上，构建动态分时电价机制，合理引导电动汽车充电行为；
- 步骤 3：深入阐述电动汽车有序充电控制策略；
- 步骤 4：构建以电动汽车运行成本为目标函数的优化调度模型；
- 步骤 5：采用改进的遗传算法对电动汽车优化模型进行求解；
- 步骤 6：输出电动汽车最优充电计划。

## 4. 算例分析

为验证本文提出的个性化有序充电策略的有效性，根据算法流程采用蒙特卡洛方法进行 Matlab 编程仿真。与传统充电方式不同，本文首先进行了无序充电和有序充电。两种策略所需的电动汽车行驶特性具有相同的概率密度函数、期望功率和充电功率。

### 4.1. 仿真参数设置

本文以比亚迪推出的秦 EV2021 款标准版为算例仿真基础，其中，电池容量为 47.53 kW·h，最大里程为 405 km，百公里耗电量 11.8 kW·h/100km。设变压器额定容量  $T$  为 750 w，充电功率为 7 kW，充电效率为 90%。在模糊有序收费中，将参与有序收费的用户比例设置为 70%，并随机选择。在个性化有序充电策略方案中，由于用户参与有序充电的具体意愿指数未知，我们将其设置为服从正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ 。 $n$  实际是随着参与填写程序问卷的人数的加入的变动而变动，本次仿真模拟默认所有参与充电车主事先填写好，人数固定，只保留两位有效数字。设立充电桩的售电初始电价为 1 元/kW·h，最低充电电价不得低于发电边际成本电价 0.25 元/kW·h，最高电价不得高于 2 元/kW·h。

### 4.2. 仿真结果

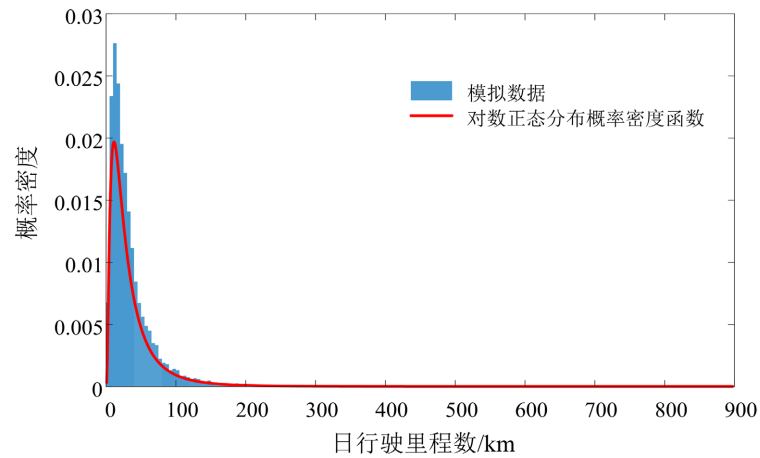
根据 2009 年美国交通部统计的 NHTS，由公式(1)可知，期望值  $\mu = 3.2$ ；标准差  $\sigma = 0.88$ 。这里将用户汽车每天最后一次返回时间设置为 EV 充电开始时刻，这里开始指进入排队充电序列，按满意度进行排序。从图中很容易看出，大多数日行驶里程数在 12 km 左右。从数据看再结合我国私家电动汽车行驶特点可知，90%左右的用户日行驶里程在 100 公里以内。并且大于 130 km 的用户数量很少，说明对于大多数家庭用车，电动汽车还是基本能满足日常出行的。

#### 4.2.1. 电动汽车充电特性分析

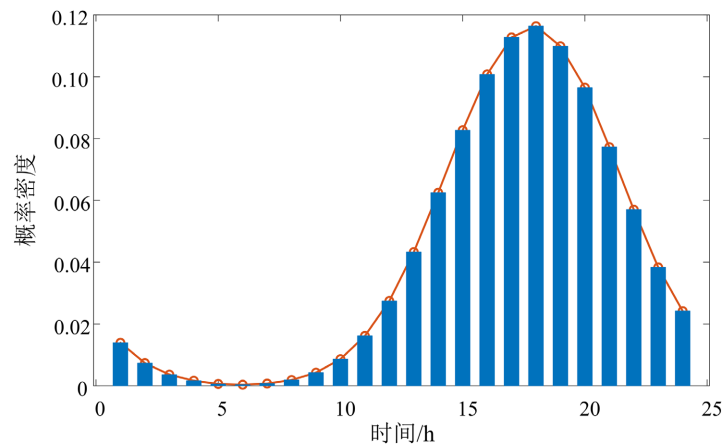
对于电动汽车充电站来说，电动汽车开始充电时间和充电需求具有随机性，本文采用蒙特卡洛模拟的方法随机生成电动汽车充电特性模型。本文从电动汽车日行驶里程和电动汽车开始充电时间两个方面对电动汽车充电特性进行分析，具体如下。

图 6 展示了电动汽车日行驶里程概率密度函数，可以看出，电动汽车日行驶数集中在 0~200 km 之间。这是由于电动汽车一般用于城市通勤，行驶里程不会太远。

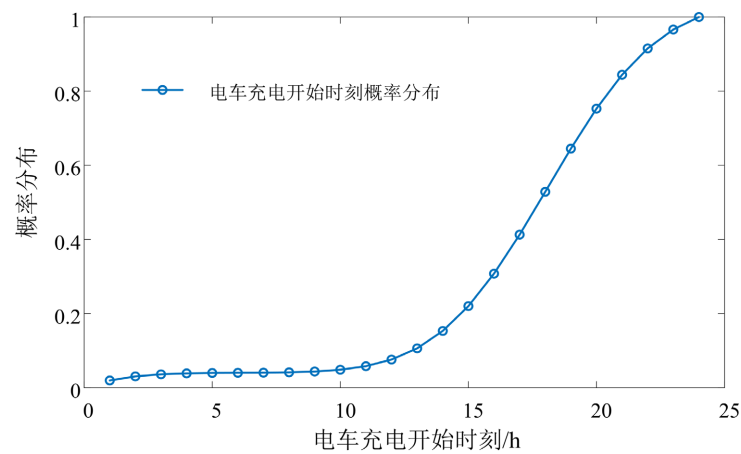
从图 7 中可以看出，用户一天中最后返回小区的时间集中在 17:00~20:00，具有很强的规律性，而且在 18:00 返回的车辆数目最多。按照前文的假设，电动汽车最后一次返回小区后即进行充电行为，即充电起始时间与车辆最后一天的返回时间一致，所有车辆开始充电时间同样具有规律性，集中在下班高峰时段。此外，图 8 展示了电动汽车充电开始时刻概率分布函数。



**Figure 6.** The probability density function (PDF) plot of daily vehicle mileage  
**图 6.** 车辆日行驶里程概率密度函数图



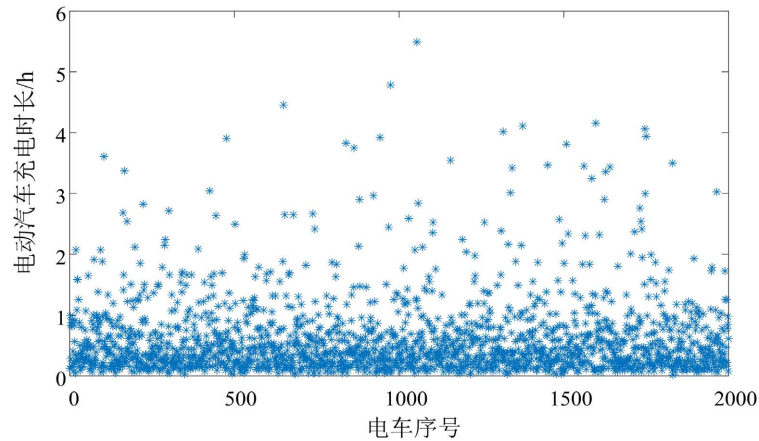
**Figure 7.** The user car returns the time probability density function plot for the last time each day  
**图 7.** 用户汽车每天最后一次返回时间概率密度函数图



**Figure 8.** The probability distribution function of the EV charging start time  
**图 8.** 电动汽车充电开始时刻概率分布函数

图 9 展示了 2000 台电动汽车充电时长仿真图，可以看出，大多数电动汽车到达充电站后，充电时间

一般处于 0~1.5 小时之间，极少数电动汽车充电时间高于 3 小时。分析表明，对于电动汽车充电站来说，单台电动汽车充电时间较短，充电需求的大小主要取决于电动汽车接入数量。



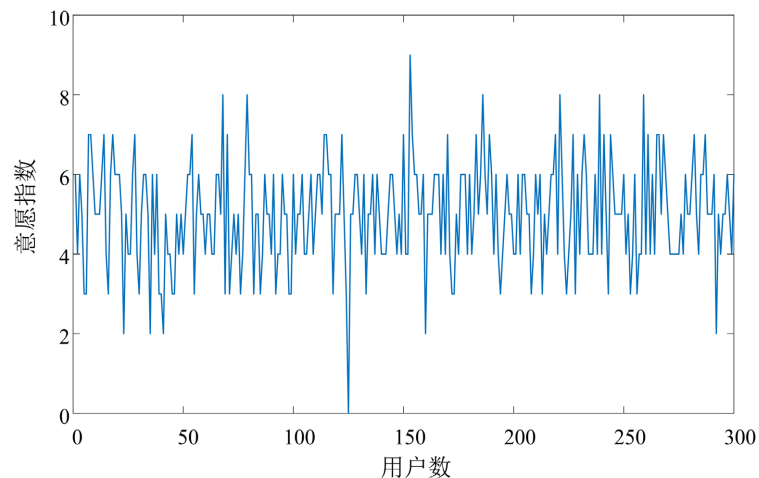
**Figure 9.** Simulation diagram of electric vehicle charging time duration  
**图 9.** 电动汽车充电时长仿真图

#### 4.2.2. 意愿指数和动态电价

电动汽车充电随机性的主要原因是由于驾驶员的意愿以及充电价格影响的，为合理描述驾驶员的充电意愿，本文采用意愿指标进行评估。

设置人数  $n$  为 300，用户通过考虑自己的需求来设置意愿指数，默认在充电前都已填好。使用随机生成的数据代入公式(5)和(6)计算得出，基本也可以看出在 5 上下浮动，也近似服从正态分布，用此数据进行动态模拟。

图 10 和图 11 分别展示了电动汽车用户的意愿指数和动态电价，对比两图可以看出，电动汽车用户的充电意愿指数与动态电价成本反比。即意愿指数越大，相应的充电价格也会越低；反之，意愿指数越小，相应的充电价格也会越高。分析表明，在某时段，电动汽车用户是否充电主要受到电动汽车剩余电量和充电价格的影响。当剩余电量较为充足、充电价格较高时，电动汽车用户会选择不进行充电；反之，剩余电量不足、充电价格较低时，电动汽车用户会选择进行充电。



**Figure 10.** User's willingness index  
**图 10.** 用户的意愿指数

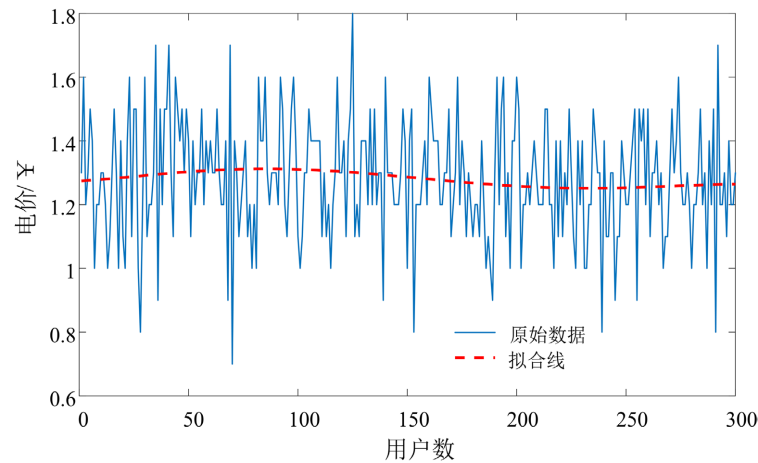


Figure 11. Dynamic electricity price

图 11. 动态电价

#### 4.2.3. 有序充电与无序充电对比

采用蒙特卡洛模拟法对两种场景下电动汽车的充电行为进行仿真。图 12 展示了电动汽车有序充电和无序充电对原系统造成的影响，具体分析如下。

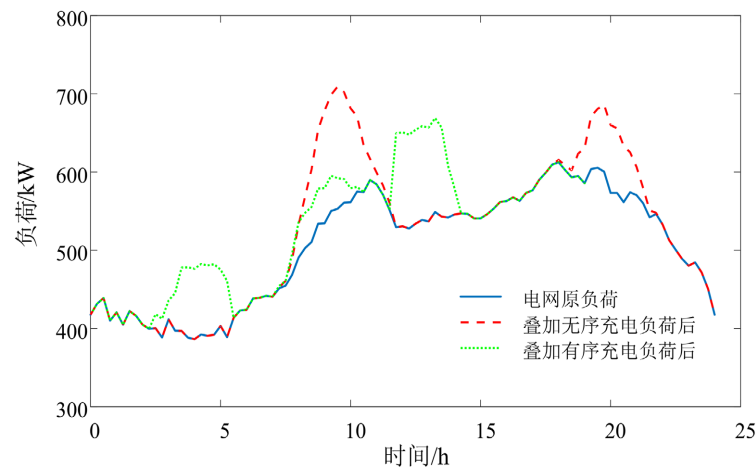


Figure 12. Load curve in the case of orderly charging

图 12. 有序充电情形下负荷曲线

由图 12 可知，电动汽车无序充电的负荷峰值与基础负荷的负荷峰值重合，由此造成了严重的“峰加峰”现象，峰谷比为 42.39%。相反，与无序充电方式相比，需求模糊有序充电策略可以在一定程度上减小峰谷差。此外，与电动汽车无序充电相比，一个调度周期内，考虑有序充电电动汽车充电成本降低 957.32 元，下降幅度为 27.63%。

相比之下，本文提出的个性化有序充电方法不仅可以起到“削峰填谷”的作用，还可以抑制负荷的波动，降低大规模电动汽车充电对电网的冲击。

## 5. 总结

本文提出了一种考虑用户参与有序充电意愿内涵的电动汽车有序充电控制策略。该策略首先采用遗传算法解决充电成本最小化的问题，并制定每个时间段的负荷计划。在此基础上，综合考虑用户的驾驶

特征、充电需求和意愿指数,对电动汽车充电的优先级进行排序,并确定每辆电动汽车在每次的充电价格时期。通过算例可得到以下结论:

1) 大规模高渗透率的电动私家车进行无序充电时,导致电网峰谷差增加,对电网稳定运行造成影响;峰谷分时电价对电动汽车入网行为的影响可起到削峰填谷的作用,随着用户对电价响应度的提高,其作用越明显。

2) 建立峰谷分时电价引导充电方式模型能比较准确地反映电价变化引起电动汽车负荷曲线变化的规律。峰谷电价方案能够对用户充电行为进行有效的引导,在降低电动汽车用户的充电费用的同时,对电网稳定性和经济性起到一定的作用。

此外,随着车联网技术的发展,电动汽车放电行为也是影响配电网运行的重要因素。下一步,将深入分析电动汽车放电特性对配网影响,完善现有电动汽车充电模型。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(72071130)。

## 参考文献

- [1] 李婕. 回眸 2022, 十组数据看亮点[N]. 人民日报海外版, 2022-12-29(004).
- [2] 沈志顺, 韩友国, 顾民, 等. 新能源汽车排队充电策略研究[J]. 汽车实用技术, 2019(7): 22-23. <https://doi.org/10.16638/j.cnki.1671-7988.2019.07.006>
- [3] 郭豪杰, 崔双喜. 基于多目标的电动汽车有序充电策略研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(17): 145-150. <https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2022.17.027>
- [4] 陈星曲, 尹常永. 电动汽车有序充电策略研究综述[J]. 电子世界, 2022(2): 13-15. <https://doi.org/10.19353/j.cnki.dzsj.2022.02.006>
- [5] 夏娟娟, 周明坚, 袁帅, 等. 电动汽车峰谷分时电价时段充电优化模型[J]. 电源技术, 2016, 40(9): 1848-1850.
- [6] 马英姿, 马兆兴. 基于博弈算法的电动汽车有序充电优化及效益分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 10-16.
- [7] 汪天允, 张浩. 基于人工鱼群算法的电动汽车优化充电策略[EB/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20210118.0959.002.html>, 2022-06-06.
- [8] 邓慧琼, 张晓飞, 曾凡淦, 郑玉焱, 付庆, 李培强. 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.
- [9] Zhou, K., Cheng, L., Wen, L., et al. (2020) A Coordinated Charging Scheduling Method for Electric Vehicles Considering Different Charging Demands. *Energy*, **213**, 118882. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118882>
- [10] Wang, N., Li, B., Duan, Y., et al. (2021) A Multi-Energy Scheduling Strategy for Orderly Charging and Discharging of Electric Vehicles Based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **44**, 101037. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101037>
- [11] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 127-134.
- [12] 苏海锋, 梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 17-22.
- [13] 程杉, 赵孟雨, 魏昭彬. 计及动态电价的电动汽车充放电优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(10): 31-36.
- [14] 杨勇. 小区电动汽车群有序充电策略优化[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2016.
- [15] 刘志珍, 杨勇, 屈东明, 王建, 黑桐. 基于分时电价的电动汽车群有序充电策略研究[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(10): 1-7. <https://doi.org/10.15938/j.emc.2017.10.001>
- [16] 孔建飞, 马存华. 基于群控群充技术公交充电站电气设计要点[J]. 智能建筑电气技术, 2022, 16(3): 82-83+88. <https://doi.org/10.13857/j.cnki.cn11-5589/tu.2022.03.016>