

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190770

## 基于分时电价的电动汽车调度策略研究

赵玉<sup>1</sup>, 徐天奇<sup>1</sup>, 李琰<sup>1</sup>, 崔琳<sup>1</sup>, 陈潇雅<sup>2</sup>

(1. 云南民族大学电气信息工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 安徽金寨抽水蓄能有限公司, 安徽 六安 237333)

**摘要:** 电动汽车作为一种新兴负荷, 大量接入配电网会对电能质量、频率稳定、电压稳定等产生一系列影响。通过对现有的分时电价制度进行分析, 在配电网方面以系统负荷均方差最小化和系统负荷峰谷差最小化为目标函数。在用户侧方面以电动汽车用户充放电成本和电池损耗成本最低作为目标函数, 建立电动汽车多目标优化调度模型。通过云自适应粒子群算法进行寻优。仿真结果表明: 该调度策略适合于分时电价, 与固定电价相比优化了系统负荷同时降低了用户成本。价差更大、均值更高的分时电价2与分时电价1相比略微增加了用户成本, 但它对电网的调峰能力明显增强。

**关键词:** 云自适应粒子群算法; 峰谷分时电价; 多目标经济调度; 电动汽车; 影响分析

### Research on electric vehicle scheduling strategy based on time-shared electricity price

ZHAO Yu<sup>1</sup>, XU Tianqi<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, CUI Lin<sup>1</sup>, CHEN Xiaoya<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Technology, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China;  
2. Anhui Jinzhai Pumped Storage Power Company Limited, Lu'an 237333, China)

**Abstract:** As an emerging load, there will be a series of impacts from electric vehicles connected largely to the power grid, such as power quality, frequency stability and voltage stability. Through analysis of the existing time-sharing electricity price system, this paper establishes a multi-objective optimization scheduling model by adopting the minimization of mean square error and peak and off-peak difference system load as the objective function in terms of power distribution network. It also uses the minimum of battery charging and discharging cost of electric car users and the minimum of battery loss as the objective function from the aspect of users. A cloud adaptive particle swarm optimization algorithm is applied in this paper. The simulation results show that the dispatching strategy is suitable for a time-sharing tariff, and compared with the fixed electricity price, the time-sharing electricity price optimizes the system load and reduces the user cost at the same time. The time-sharing electricity price 2, where the peak-valley price difference is larger and the mean value is higher, increases slightly the user cost compared with the time-sharing electricity price 1, but the peak-regulating capacity of the power grid is evidently enhanced.

This work is supported by National Natural Science Foundation Project of China (No. 61761049) and Scientific Research Foundation Project of Yunnan Education Department (No. 2019Y0168) and Yunnan Applied Basic Research Youth Project (No. 2018FD052).

**Key words:** cloud adaptive particle swarm optimization; peak-valley time pricing; multi-objective economic dispatching; electric vehicle; impact analysis

## 0 引言

电动汽车作为一种新兴负荷, 大量接入电网会

对电力系统产生一系列的影响, 例如将负荷的峰谷差值进一步增大, 配电网负荷局部过载, 电网部分母线电压过低, 线路损耗增大, 配电网变压器容量越限等问题。而电动汽车的调度控制策略主要考虑的是配电系统的负荷平衡因素和配电容量, 为了提高用户满意度, 还要考虑电池损耗成本和电动汽车充放电成本。为了解决电动汽车接入电网产生的影

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(61761049); 云南省教育厅科学研究基金项目资助(2019Y0168); 云南省应用基础研究青年项目资助(2018FD052)

响,通过对电动汽车充放电合理地调度能够优化电网负荷的同时降低用户成本。

在峰谷分时电价下对电动汽车充放电调度,国内外学者已经开展了相关研究。文献[1]结合峰谷分时电价与局域配电网负荷波动情况,在考虑用户满意度的前提下,以减小电网峰谷差为主要目标,同时划分了电动汽车充电分时电价时段,但是并未研究电动汽车向电网馈电。文献[2]基于峰谷分时电价,通过电动汽车(Electric Vehicle, EV)向电网馈电,对系统负荷起到了削峰填谷的作用。文献[3]研究了用户满意度和电价定价的关系,提出了一种分时电价下EV多目标充电优化模型。文献[4]在峰谷分时电价的基础上,对配电网的负荷波动和电动汽车的充放电成本进行了研究,但是没有考虑线路容量约束。文献[5]建立EV充电负荷动态概率模型,研究了EV响应分时电价不确定性所导致的调度、负荷波动等问题,仿真结果表明定价策略的优越性。文献[6]在考虑充电约束条件的前提下,采用了动态响应分时电价,以客户充电成本最小化和削峰填谷为目标,提出了有序充电启发式算法。文献[7]重点考虑了充电站运营经济最大化,但是没有考虑电网负荷波动,导致大量的电动汽车用户在谷时段进行充电造成了“雪崩效应<sup>[8]</sup>”。如今研究分时电价较多,然而在考虑到经济效益时,对于电动汽车充放电调度中电池循环充放电退化成本考虑很少。

文献[9]在输电和配电系统层面,对EV充放电调度进行了优化,但未对EV充电需求进行细化。文献[10-11]分析了动力电池几种电路模型,得出了各种模型在精确性和复杂性上各有优劣。文献[12]对电池的损耗进行了分析。文献[13-14]对云理论和云自适应粒子群算法进行了分析研究和应用。文献[15-17]介绍了V2G(Vehicle to Grid)技术,并且能够为电网进行调幅和调频。文献[18]对电动汽车放电的电价定价模型进行了研究和分析。文献[19]研究了在不同价格策略下V2G参与者响应度的变化。文献[20]通过V2G技术反向供电,能够实现对电网负荷的削峰填谷。文献[21]重点分析了电动汽车的充电模式对配电系统日负荷曲线产生的影响,但是没有考虑电动汽车的放电,优化结果体现在“填谷”的效果比较明显。文献[22]在分时电价的基础上对电动汽车充放电调度,但是并没有与输电网侧发电机组进行协调。

本文在电动汽车用户侧构建电动汽车充放电成本和电池损耗成本作为目标函数,在电网负荷方

面建立负荷均方差和负荷峰谷差两个目标函数,通过线性加权和法对目标函数归一化,在V2G模式和峰谷分时电价制度下,基于某商用楼宇负荷进行算例仿真,通过云自适应粒子群算法进行寻优,对固定电价和两种分时电价进行分析,在优化电网负荷的同时能够降低电动汽车用户充放电成本和电池损耗成本。

## 1 峰谷分时电价原理与模型

### 1.1 电量电价弹性矩阵的建立

电量电价弹性矩阵的建立方法具体参考文献[23], $\rho_{ii}$ 为电量电价自弹性系数,表示为用户对峰谷分时电价的单时段响应。

$$\rho_{ii} = \frac{\Delta Q_i / Q_i}{\Delta P_i / P_i} \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = \int [f_{\text{TOU},t}(P_p, P_s, P_v) - f_t(P_t)] dt \quad (2)$$

$$\Delta P_i = P_{\text{TOU},i} - P_i \quad (3)$$

式中: $\Delta Q_i$ 和 $\Delta P_i$ 分别为*i*时段用户执行分时电价前后的电量变化值和电价变化值; $P_{\text{TOU},i}$ 和 $P_i$ 分别为*i*时段的峰谷分时电价和未执行峰谷电价之前的电价; $P_p$ 表示峰电价, $P_s$ 表示平电价, $P_v$ 表示谷电价, $f_{\text{TOU},t}(P_p, P_s, P_v)$ 表示执行电价后的用户负荷量值, $f_t(P_t)$ 表示执行峰谷电价前的负荷量值,在 $\Delta P_i = 0$ 的情况下,电量电价矩阵中的用户自弹性系数取值为0。

$\rho_{ij}$ 执行峰谷电价的多时段响应被定义为交叉弹性系数:

$$\rho_{ij} = \frac{\Delta Q_i / Q_i}{\Delta P_j / P_j} \quad (4)$$

通过上述分析,电量电价弹性矩阵为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdots & \rho_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$n$ 为时段数。

### 1.2 峰谷分时电价用户响应度模型

由式(5)可求出实行峰谷电价后用户用电量变化率列向量。

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 / Q_1 \\ \Delta Q_2 / Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n / Q_n \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \mathbf{E} \begin{bmatrix} \Delta P_1 / P_1 \\ \Delta P_2 / P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n / P_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

实行峰谷分时电价后的用电量为

$$\begin{bmatrix} Q'_1 \\ Q'_2 \\ \vdots \\ Q'_n \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} Q_1 & & & \\ & Q_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & Q_n \end{bmatrix} \mathbf{E} \begin{bmatrix} \Delta P_1/P_1 \\ \Delta P_2/P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n/P_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $Q'_i$  为实行峰谷分时电价后  $i$  时段的用电量。

电价的变化改变了电动汽车用户对电量需求的影响, 并且实现电力需求侧管理的重要途径之一是有效根据实际情况制定分时电价, 对于电动汽车调度策略来说峰谷分时电价的制定也是研究的重点之一。相比较于固定电价, 分时电价更考虑到了用户的用电成本, 当处于负荷高峰期的时候, 提高电价, 在负荷低谷期, 降低电价, 从而使用户错开用电高峰期, 在优化负荷的同时能够降低用户成本。但是在负荷高峰期定价过高, 虽然能够优化电网负荷, 但是会大大降低用户的满意度; 如果在负荷低谷期定价过低, 又会造成系统的峰谷倒置, 得不偿失。具体在某一时段如何定价, 本文在第 5 节算例分析中通过峰谷分时电价 1 和峰谷分时电价 2(峰谷价差更大、均值更高)具体分析。

## 2 V2G 和电池原理模型

### 2.1 V2G 原理

V2G 概念于 1995 年被 Amory Lovins 提出, 在 1997 年 William Kempton 对其进行深入的分析研究, 起初的目的是使用电动汽车去优化配电网的负荷曲线, 并在峰谷分时电价的基础上使电动汽车用户获得一定的收益。V2G 是智能电网和电动汽车在发展过程中产生的一种可以进行能量和信息双向交换的技术。电动汽车可以作为系统负荷进行充电, 也可以作为电源进行并网, 用于电网的负荷特性调节等。V2G 使用了通信信息技术、电力调度、电力电子、智能控制、能量计算、传感器网络等新兴技术, 通过电网公司、电动汽车运营商和电动汽车用户之间的信息交流可以有效控制能量的双向流动<sup>[24-25]</sup>。

### 2.2 锂离子电池模型<sup>[18,26-28]</sup>

电池退化主要由电动汽车循环充放电产生, 也与电池类型有关。本文采用仅与电池总循环次数成比例的线性模型研究锂离子电池, 文献[27]给出的曲线如图 1 所示, 数值由电池制造商给出。该模型与电池更换成本有关, 由此可得电池退化成本  $C_{ij}^{V2G}$ 。图 1 中, “●” 表示数据值, “—” 表示拟合曲线。

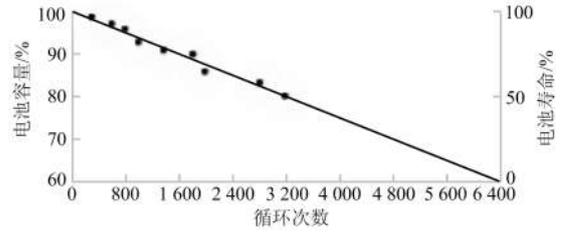


图 1 纳米磷酸铁锂电池循环次数-寿命曲线关系

Fig. 1 Cycles-life curve of a Nan ophosphate Li-ion battery

## 3 电动汽车充放电调度策略模型

### 3.1 电动汽车充放电成本和电池损耗成本

以用户成本最低为目标函数, 第一部分为电池退化成本<sup>[28]</sup>; 第二部分为电动汽车充放电成本。电池荷电状态(SOC)表示电池剩余电量与额定电量的比值。

$$f_1 = \min \sum_{j=1}^{24} \sum_{i=1}^n (C_{ij}^{V2G} + |P_{ij}| S_j) \quad (8)$$

$$C_{ij}^{V2G} = \frac{k}{100} | \chi_{ij} C^B \quad (9)$$

$$\chi_{ij} = \max \{0, (SOC_{i,j-1} - SOC_{ij}) T\} \quad (10)$$

式中:  $S_j$  为电网在  $j$  时刻的电价(元/kW·h), 正值表示电动汽车充电电价, 负值为电动汽车用户向电网馈电的补贴电价;  $P_{ij}$  为电动汽车  $i$  在  $j$  时刻的功率, 正值表示充电, 负值表示放电;  $n$  表示电动汽车的数量;  $C_{ij}^{V2G}$  为电动汽车  $i$  在  $j$  时段的电池退化成本(元/kW·h);  $k$  为电池寿命与循环次数之间的线性关系系数, 即图 1 的拟合曲线斜率;  $\chi_{ij}$  为电动汽车  $i$  在  $j$  时刻的循环充放电电量(kW·h);  $C^B$  为电池更换成本(元);  $T$  为电池额定电量(kW·h)。

### 3.2 负荷均方差

负荷均方差越小, 负荷的波动越平稳。把一天 24 个时段的每辆电动汽车的充放电功率当作控制变量, 即

$$f_2 = \min \sum_{j=1}^{24} (P_{Lj} + \sum_{i=1}^n P_{ij} - P_{avr})^2 \quad (11)$$

$$P_{avr} = \sum_{j=1}^{24} (P_{Lj} + \sum_{i=1}^n P_{ij}) / 24 \quad (12)$$

式中:  $P_{Lj}$  为原电网不含电动汽车负荷  $j$  时段功率;  $P_{avr}$  为调度后的日平均负荷。

### 3.3 负荷峰谷差

以负荷曲线峰谷差最小为目标函数, 表示为

$$P_{Lj}^{\Delta} = P_{Lj} + \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (13)$$

$$f_3 = \min[\max(P_{Lj}^{\Delta}) - \min(P_{Lk}^{\Delta})] \quad (14)$$

式中:  $\max(P_{Lj}^{\Delta})$  为调整后负荷峰值;  $\min(P_{Lk}^{\Delta})$  为调整后负荷谷值。

### 3.4 基于模糊逻辑理论的多目标函数处理

把多目标函数  $f_1$ 、 $f_2$  和  $f_3$  采用线性加权和法转化为单目标函数, 并对  $f_1$ 、 $f_2$  和  $f_3$  进行规范化处理, 如式(15)所示。

$$\min f = \omega_1 \left( \frac{f_1}{f_{1\max}} \right) + \omega_2 \left( \frac{f_2}{f_{2\max}} \right) + \omega_3 \left( \frac{f_3}{f_{3\max}} \right) \quad (15)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \quad (16)$$

$$f_{2\max} = \sum_{j=1}^{24} \left( P_{Lj} - \frac{\sum_{j=1}^{24} P_{Lj}}{24} \right)^2 \quad (17)$$

$$f_{3\max} = \max(P_{Lj}) - \min(P_{Lk}) \quad (18)$$

式中:  $f_{1\max}$  为传统用车习惯下车主的日充电成本和电池损耗成本;  $f_{2\max}$  为原始电网负荷曲线的均方差;  $f_{3\max}$  为原始电网负荷曲线的峰谷差;  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  分别代表目标函数  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  的权重系数。

目标函数  $f_2$  和目标函数  $f_3$  都是为了使系统负荷波动平缓为目的。将  $f_2$  和  $f_3$  两个目标转化为单目标可以实现“削峰填谷”, 优化系统负荷。基于文献[23]和文献[29]将上述多目标优化问题转化为

$$\min f = \frac{\lambda_1}{2} \left[ \left( \frac{f_2}{f_{2\max}} \right) + \left( \frac{f_3}{f_{3\max}} \right) \right] + \lambda_2 \left( \frac{f_1}{f_{1\max}} \right) \quad (19)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (20)$$

式中:  $\lambda_1$  表示负荷峰谷差和系统波动平缓的权重;  $\lambda_2$  表示电动汽车用户成本的权重。

根据文献[23]和文献[30], 当峰谷差较小和系统负荷的波动比较平缓时,  $\lambda_1$  可能取较小值; 当电动汽车用户对电价波动不敏感时,  $\lambda_2$  可能取较小值。 $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是带有主观因素的模糊判断, 如表 1 所示。

表 1 模糊描述的赋值方法

Table 1 Method of evaluation based on fuzzy logic

模糊描述	赋值[A, B]
A 与 B 同等重要	[0.5,0.5]
A 比 B 稍微重要	[0.6,0.4]
A 比 B 明显重要	[0.7,0.3]
A 比 B 很重要	[0.8,0.2]
A 比 B 极端重要	[0.9,0.1]

### 3.5 模型约束条件

根据电动汽车充放电调度策略的前期研究<sup>[4,31]</sup>, 故忽略线路容量和车辆可用时间约束, 所有电动汽车 24 h 均可参与调度。

#### 1) 充放电功率约束

$$P_{ij\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij\max} \quad (21)$$

式中:  $P_{ij\min}$  表示第  $i$  辆电动汽车在第  $j$  时刻的放电功率最大值的约束, 为负值;  $P_{ij\max}$  则代表第  $i$  辆电动汽车在第  $j$  个时刻的充电功率最大值的约束, 为正值。充电电流  $0 \leq I_c \leq C/15$ , 放电电流  $0 \leq I_d \leq C/3$ ,  $C$  为 1 h 充满蓄电池所需电流。

#### 2) 电池可用容量约束

电池寿命一般与电池的循环放电次数和放电深度有关, 对电池荷电状态的上、下限进行约束可以延长电池寿命。

$$SOC_{ij\min} \leq SOC_{ij} \leq SOC_{ij\max} \quad (22)$$

式中:  $SOC_{ij}$  为电动汽车  $i$  在  $j$  时刻的荷电状态,  $SOC_{ij\min}$  为电动汽车  $i$  在  $j$  时刻荷电状态的下限,  $SOC_{ij\max}$  为电动汽车  $i$  在  $j$  时刻荷电状态的上限。考虑到车用蓄电池安全的前提下,  $SOC_{ij\min}$  取值 0.2,  $SOC_{ij\max}$  取值 0.9。

## 4 调度策略求解

采用线性规划等经典优化算法很难解决多变量、非线性、多约束、高维的电动汽车充放电调度优化问题, 考虑到标准粒子群算法容易陷入局部最优, 本文采用云自适应粒子群算法进行寻优。

### 4.1 标准粒子群算法

标准粒子群优化算法(PSO)首先初始化一群随机粒子, 粒子群就追随当前的最优粒子在解的空间不断地进行搜索, 不断地迭代寻找最优解<sup>[32-35]</sup>。该算法通过式(23)一式(25)进行迭代更新粒子的位置和速度, 具体参考文献[14]。

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (23)$$

$$\begin{cases} v_{id} = v_{\max}, v_{id} > v_{\max} \\ v_{id} = -v_{\max}, v_{id} < -v_{\max} \end{cases} \quad (24)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (25)$$

式中:  $i$  取值范围为  $[1, N]$ ;  $d$  的取值范围为  $[1, D]$ ;  $r_1$  和  $r_2$  取  $(0,1)$  之间的随机数;  $k$  为当前迭代的次数大于零;  $C_1$  和  $C_2$  为学习因子, 取值范围为  $[0, 4]$ ;  $v_{\max}$  是常数, 可自行设定。

#### 4.2 云理论<sup>[13]</sup>

设  $Z$  是一个普通的集合,  $Z = \{x\}$ , 称为论域。 $Z$  上对应着模糊集合  $A$ , 对于论域中任意一个元素  $x$  都存在一个稳定倾向的随机数  $y = e^{\frac{-(x-Ex)^2}{2(En')^2}}$ , 叫作  $x$  对模糊集合  $A$  的确定度。假如论域中的  $x$  是简单有序的,  $Z$  可以看作是基础变量, 确定度在  $Z$  上的分布称为云; 如果论域中的  $x$  是复杂无序的, 则把  $Z$  映射到另外一个简单有序的论域  $Z'$  上,  $Z'$  中有且仅有一个  $x'$  和  $x$  对应, 则称  $Z'$  为基础变量, 确定度在  $Z'$  上的分布称为云。

正态云发生器生成算法为

- (1) 通过熵  $En$  和超熵  $He$  生成一个正态随机数  $En'$ ;
- (2) 通过期望  $Ex$  和  $En'$  的绝对值为标准差生成一个正态随机数  $x$ ,  $x$  被称为论域空间中的一个云滴;
- (3) 计算  $y = e^{\frac{-(x-Ex)^2}{2(En')^2}}$ , 令  $y$  为  $x$  属于模糊集合  $A$  的确定度;
- (4) 重复步骤(1)~(3), 直到产生  $N$  个云滴为止。

#### 4.3 云自适应粒子群优化算法(CAPSO)

惯性权重  $\omega$  决定了粒子先前的速度对当前速度的影响程度, 可以加快全局搜索能力和优化局部搜索能力。 $\omega$  取值较大有利于增加粒子跳出局部寻优进行全局寻优,  $\omega$  取值较小有利于粒子的局部寻优加快收敛的速度。引入新的速度更新公式为

$$v_{id}^{k+1} = \omega \cdot v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (26)$$

自适应调整策略为<sup>[13,36]</sup>:

$f_i$  为第  $K$  次迭代中  $X_i$  的适应度值,

$f_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i$  为粒子群的平均适应度值, 把适应度

值好于  $f_{avg}$  的适应值求平均得到  $f'_{avg}$ ; 把适应度值差于  $f_{avg}$  的适应值求平均得到  $f''_{avg}$ ; 最优粒子的适应度值为  $f_{min}$ 。当  $f_i$  优于  $f'_{avg}$  时,  $\omega$  取 0.2; 当  $f_i$  次于  $f''_{avg}$  时,  $\omega$  取 0.9; 当  $f_i$  优于  $f''_{avg}$  但次于  $f'_{avg}$  时, 自适应粒子群惯性权重  $\omega$  生成算法为

$$Ex = f'_{avg} \quad (27)$$

$$En = (f'_{avg} - f_{min}) / C_1 \quad (28)$$

$$He = En / C_2 \quad (29)$$

$$En' = normrnd(En, He) \quad (30)$$

$$\omega = 0.9 - 0.5 \times e^{\frac{-(f_i - Ex)^2}{2(En')^2}} \quad (31)$$

随着粒子的适应度值一点点减小, 由数学极限

定理可知,  $0 < e^{\frac{-(f_i - Ex)^2}{2(En')^2}} < 1$ , 保证了  $\omega \in [0.4, 0.9]$ 。

CAPSO 具体求解流程如下:

- 步骤 1 输入算法基本参数, 初始化粒子数量  $N$ 、最大迭代次数, 并初始化粒子的位置和速度。
- 步骤 2 不同粒子  $X_i$  的适应度值采用不同的惯性权重生成策略, 普通子群用云理论自适应地调整惯性权重  $\omega$ , 根据式(25)和式(26)更新  $X_i$  的位置和速度。
- 步骤 3 计算  $X_i$  的适应度值  $f_i$ , 若  $f_i$  优于原来的个体极值  $p_i$ , 则当前适应度值为个体极值  $p_i$ 。
- 步骤 4 根据个体粒子的个体极值  $p_i$ , 找出全局极值  $p_g$ 。
- 步骤 5 若满足终止条件, 则执行步骤 6, 否则转向步骤 2。
- 步骤 6 输出  $p_g$  值和目标值并终止云自适应粒子群算法。

根据以上描述, CAPSO 算法流程图如图 2 所示。

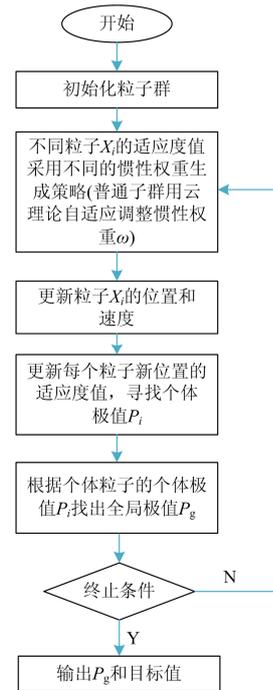


图 2 CAPSO 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of CAPSO algorithm

## 5 算例分析

### 5.1 仿真参数设置

本文中设置每辆电动汽车的电池容量值为 32.7 (kW·h), 初始荷电状态为 0.3, 电池更换成本为 41 000 元, 一共有 5 辆电动汽车参与调度。固定电

价设置为 0.75 元/kW·h, 馈电补贴电价统一设置为 0.1 元/kW·h; 学习因子  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $f_{1max}$  取值为 210, 粒子种群数目取值为 100, 迭代次数取 2 000; 商用建筑典型日用电负荷如表 2 所示, 分时电价 1 和分时电价 2 如表 3 所示<sup>[4]</sup>。

表 2 商用建筑典型日用电负荷

Table 2 Typical daily electrical load of commercial buildings

时段	功率/kW	时段	功率/kW
1	65	13	99
2	64	14	81
3	62	15	82
4	64	16	74
5	64	17	78
6	64	18	93
7	80	19	100
8	77	20	92
9	81	21	87
10	90	22	74
11	101	23	66
12	101	24	55

表 3 商业用电分时电价

Table 3 Time-of-use price

时段	分时电价 1/(元/kW·h)	分时电价 2/(元/kW·h)
23:00—7:00	0.360	0.300
7:00—8:00	0.687	0.712
8:00—11:00	1.070	1.120
11:00—12:00	1.070	1.210
12:00—14:00	1.070	1.120
14:00—18:00	0.687	0.712
18:00—19:00	1.070	1.120
19:00—21:00	1.070	1.210
21:00—23:00	1.070	1.120

## 5.2 仿真结果分析

### (1) $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ 时优化结果分析

对于目标函数  $\min f$ , 通过云自适应粒子群算法进行寻优, 分别对固定电价、分时电价 1 和分时电价 2 下粒子收敛曲线、电网负荷曲线、电动汽车电池的荷电状态变化情况进行了仿真分析, 不同电价下的粒子收敛曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出: 粒子在迭代大约 1 000 次的时候全部收敛。

3 种电价下优化后的负荷曲线和原始负荷曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, 固定电价和分时电价优化后的负荷曲线与原始负荷曲线相比变化比较平缓, 峰值有所下降, 谷值也得到了提升。

原始负荷和不同电价下的负荷曲线优化数值如表 4 所示。

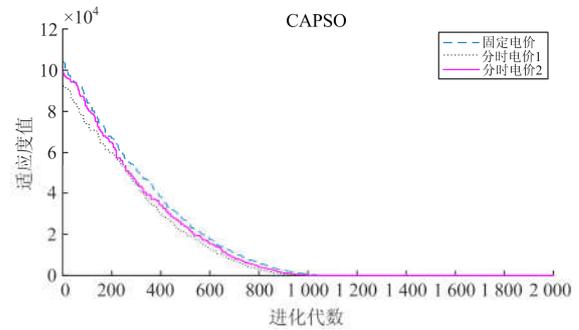


图 3 粒子收敛曲线

Fig. 3 Particle convergence curve

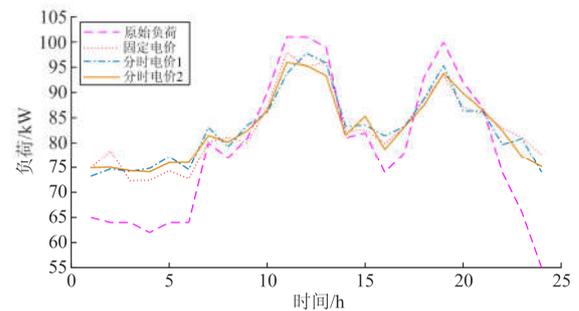


图 4 固定电价和分时电价优化后的负荷曲线与原始负荷曲线

Fig. 4 Load curve and initial load curve after optimizing fixed price and hourly price

表 4 原始负荷和各电价下负荷曲线优化数值

Table 4 Optimized value of load curve under initial load and electricity price

电价制度	峰值/kW	谷值/kW	负荷率/%
原始负荷	101	55	78.14
固定电价	97.96	72.35	84.52
分时电价 1	97.78	73.25	84.83
分时电价 2	95.96	74.15	86.28

由表 4 可知, 固定电价与原始负荷相比负荷率提升了 6.38%; 分时电价 1 和分时电价 2 与固定电价相比负荷率分别提高了 0.31%和 1.76%, 因此分时电价的执行有利于电网的安全稳定运行。而分时电价 2 与分时电价 1 相比, 负荷率提高了 1.45%, 从而在峰谷价差更大、均值更高的情况下, 更有利于提高系统的调峰能力。

固定电价和分时电价下电动汽车的 SOC 变化如图 5 所示。

由图 5 可知, 假设每一辆电动汽车在 24 h 内均可参与调度, 电动汽车作为灵活的储能设备能够在保证车主常规用车需求的前提下参与电网的削峰填谷。

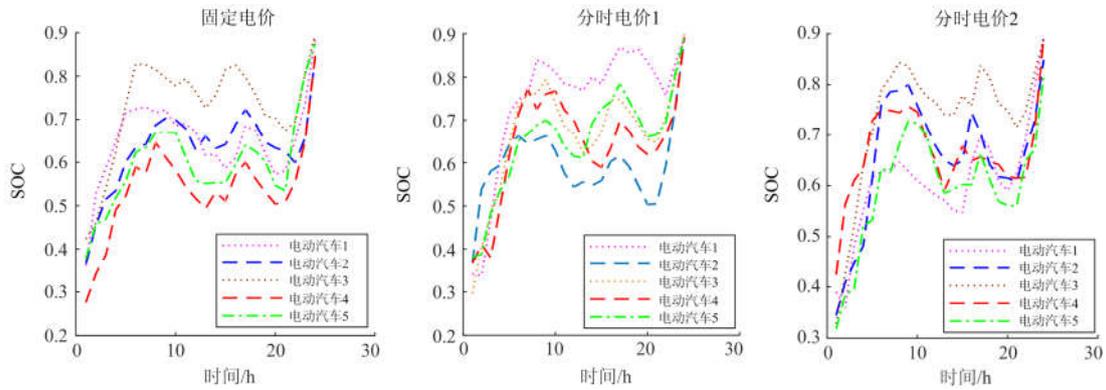


图 5 固定电价和分时电价下电动汽车的 SOC 变化

Fig. 5 SOC change of electric vehicle under fixed electricity price and hourly electricity price

对于 3 种不同电价，各目标函数优化数值如表 5 所示。

表 5 固定电价和分时电价下各目标函数优化数值

Table 5 Optimization values of each objective function under fixed price and hourly price

电价制度	用户成本/ 元	负荷均方差 /(kW) <sup>2</sup>	峰谷差/ kW
固定电价	29.601	1 275.849 3	25.607 8
分时电价 1	28.563 4	1 245.250 7	24.534
分时电价 2	29.338 9	1 143.449 3	21.812 4

由表 5 可以看出：分时电价 1 与固定电价相比，用户成本降低了 1.037 6 元/天，负荷均方差减小了 2.40%，峰谷差减小了 4.19%。因此分时电价 1 与固定电价相比在降低用户成本的前提下能够优化电网负荷，使负荷曲线波动比较平缓，实现电网的“削峰”与“填谷”。

分时电价 2 与分时电价 1 相比，分时电价 2 的用户成本提高了 0.775 5 元/天，负荷均方差减小了 8.18%，负荷峰谷差减小了 11.09%。从而分时电价 2 在峰谷价差更大、均值更高的情况下更能够优化电网负荷，提高系统的调峰能力。但是，在提高电网调峰能力的前提下，用户的成本却增加了 0.775 5 元/天，减小了用户的满意度。

综上所述，分时电价相比较于固定电价，用户成本、负荷均方差和负荷峰谷差均低于固定电价，负荷率升高，能够更好地优化电网负荷波动。但是分时电价 2 的用户成本高于分时电价 1，为了更好地提高系统调峰能力，电网可对用户进行用电补贴来减少用户成本。

(2) 不同权重时优化结果分析

$\lambda_1 = 0.6$ 、 $\lambda_2 = 0.4$  时固定电价和分时电价优化后的负荷曲线和原始负荷曲线如图 6 所示。

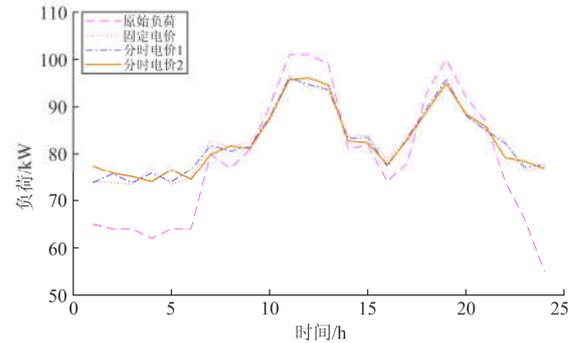


图 6 固定电价和分时电价优化后的负荷曲线与原始负荷曲线

Fig. 6 Load curve and initial load curve after optimizing fixed price and hourly price

由图 6 可知，对于不同权重时优化的固定电价和分时电价下的负荷曲线相比较于原始负荷均趋于平缓，峰谷差减小；并且分时电价 2 相比较于固定电价和分时电价 1 优化后的负荷曲线更加平缓，系统更加稳定。

不同权重时各目标函数优化数值如表 6 所示。

表 6 固定电价和分时电价下各目标函数优化数值

Table 6 Optimization values of each objective function under fixed price and hourly price

$\lambda$	电价制度	用户成本/元	负荷均方差/(kW) <sup>2</sup>	峰谷差/kW
$\lambda_1=0.5$ $\lambda_2=0.5$	固定电价	29.601	1 275.849 3	25.607 8
	分时电价 1	28.563 4	1 245.250 7	24.534
	分时电价 2	29.338 9	1 143.449 3	21.812 4
$\lambda_1=0.4$ $\lambda_2=0.6$	固定电价	28.992 2	1 353.282 5	23.650 8
	分时电价 1	27.603 2	1 349.153 5	23.258 4
	分时电价 2	28.870 2	1 271.701 8	22.291 3
$\lambda_1=0.6$ $\lambda_2=0.4$	固定电价	29.999	1 237.858 6	23.226 5
	分时电价 1	29.194 2	1 181.622	22.38
	分时电价 2	29.831 9	1 154.837 8	22.110 5

由表 6 可知, 相比较于  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ , 当  $\lambda_1$  (负荷峰谷差和系统波动平缓的权重) 取值较大时, 用户成本稍微增加, 系统波动变小, 有利于系统安全稳定运行; 当  $\lambda_2$  (电动汽车用户成本的权重) 取值较大时, 系统波动变大, 电动汽车用户成本降低。

## 6 结论

本文采用多目标控制策略对某建筑典型日负荷数据进行仿真, 采用云自适应粒子群算法进行寻优, 通过不同电价的仿真结果对比分析了不同调度策略。仿真结果表明: 分时电价与固定电价相比优化了系统负荷的同时降低了用户成本, 分时电价 2 与分时电价 1 相比增加了用户成本, 但是电网调峰能力更加明显。

分时电价下对电动汽车有序调度可以提高系统的负荷曲线特性。同时考虑电网的负荷波动与电动汽车用户的充放电成本和电池损耗成本, 如何使二者达到综合最优受目标函数权重的影响很大。为了更好地提高用户的满意度和优化系统的负荷曲线特性, 研究多目标优化控制策略权重的动态变化对调度结果的影响和如何合理地调度大规模电动汽车入网是值得进一步探讨的问题。

## 参考文献

- [1] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.  
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [2] 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.  
YAN Jun, YAN Feng. An orderly charging and discharging strategy for residential electric vehicles based on peak-valley[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 127-134.
- [3] 崔金栋, 罗文达, 周念成. 基于多视角的电动汽车有序充放电定价模型与策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4438-4450.  
CUI Jindong, LUO Wenda, ZHOU Niancheng. Research on pricing model and strategy of electric vehicle charging and discharging based on multi view[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4438-4450.
- [4] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2972-2977.  
WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977.
- [5] 杨健维, 苟方杰, 黄宇, 等. 基于不确定性测度的居民小区电动汽车充电分时电价制定策略[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 96-102.  
YANG Jianwei, GOU Fangjie, HUANG Yu, et al. Residential area electric vehicle charging pricing strategy based on uncertainty measure[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 96-102.
- [6] CAO Y, TANG S, LI C, et al. An optimized EV charging model considering TOU price and SOC curve[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 388-393.
- [7] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 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.  
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.
- [8] GOTTWALT S, KETTER W, BLOCK C, et al. Demand side management-a simulation of household behavior under variable prices[J]. Energy Policy, 2011, 39(12): 8163-8174.
- [9] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 22-28.  
HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bilayer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 22-28.
- [10] EINHORN M, CONTE V, KRAL C, et al. Comparison of electrical battery models using a numerically optimized parameterization meth[C] // 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 6-9, 2011, Chicago, USA: 1-7.
- [11] ZHANG H L, CHOW M Y. Comprehensive dynamic battery modeling for PHEV applications[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Providence, RI, USA: 1-6.
- [12] KEJUN Q. Temperature effect on electric vehicle battery cycle life in vehicle-to-grid applications[C] // Electricity Distribution (CICED), Jiangsu Electric Power Company, September 13-16, 2010, Nanjing, China: 1-6.
- [13] 刘洪霞, 周永权. 一种基于均值的云自适应粒子群算法[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(5): 97-101.  
LIU Hongxia, ZHOU Yongquan. A cloud adaptive

- particle swarm optimization algorithm based on mean[J]. *Computer Engineering & Science*, 2011, 33(5): 97-101.
- [14] 韦杏琼, 周永权, 黄华娟, 等. 云自适应粒子群算法[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(1): 48-50.  
WEI Xingqiong, ZHOU Yongquan, HUANG Huajuan, et al. Adaptive particle swarm optimization algorithm based on cloud theory[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(1): 48-50.
- [15] SORTOMME E, EL-SHARKAWI M A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(1): 351-359.
- [16] 闫志杰, 张蕊萍, 董海鹰, 等. 基于需求响应的电动汽车充放电电价与时段研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(15): 16-22.  
YAN Zhijie, ZHANG Ruiping, DONG Haiying, et al. Price and period research of electric vehicles charging and discharging based on demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(15): 16-22.
- [17] 刘东奇, 钟庆昌, 王耀南, 等. 基于同步逆变器的电动汽车 V2G 智能充放电控制技术[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 544-556.  
LIU Dongqi, ZHONG Qingchang, WANG Yaonan, et al. A synchronverter-based V2G smart charging and discharging control strategy for electric vehicles[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 544-556.
- [18] 孙波, 施泉生. 电动汽车入网的放电电价定价模型分析[J]. *华东电力*, 2011, 39(7): 1029-1032.  
SUN Bo, SHI Quansheng. Analysis on discharge pricing model for vehicle-to-grid[J]. *East China Electric Power*, 2011, 39(7): 1029-1032.
- [19] 史乐峰. 基于逆向供应的 V2G 市场电价策略研究[J]. *管理工程学报*, 2012, 26(2): 113-118.  
SHI Lefeng. V2G market price strategy based on reverse supply[J]. *Journal of Industrial Engineering Management*, 2012, 26(2): 113-118.
- [20] 王鑫, 周步祥, 唐浩. 考虑用户因素的电动汽车有序充放电控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(4): 129-137.  
WANG Xin, ZHOU Buxiang, TANG Hao. A coordinated charging/discharging strategy for electric vehicles considering customers' factors[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(4): 129-137.
- [21] 和敬涵, 谢毓毓, 叶豪东. 电动汽车充电模式对主动配电网的影响[J]. *电力建设*, 2015, 36(1): 97-102.  
HE Jinghan, XIE Yuyu, YE Haodong. Influence of electric vehicles charging modes on active network distribution[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(1): 97-102.
- [22] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(1): 17-23.  
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(1): 17-23.
- [23] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型[J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(20): 14-18.  
DING Wei, YUAN Jiahai, HU Zhaoguang. Time-of-use price decision model considering uses reaction and satisfaction index[J]. *Automation of Electric Power System*, 2005, 29(20): 14-18.
- [24] 冯培磊. 电动汽车充放电多目标优化调度策略及选择充电站最佳经济路径的方法研究[D]. 昆明: 云南民族大学, 2019.  
FENG Peilei. Research on multi-objective optimized scheduling strategy for charging and discharging of electric vehicles and cost-optimal routing to charging stations[D]. Kunming: Yunnan Minzu University, 2019.
- [25] HAN S, HAN S H, SEZAKI K. Design of an optimal aggregator for vehicle to grid regulation service[C] // *Proceedings of Innovative Smart Grid Technologies*, January 19-21, 2010, Gaithersburg, MD, USA: 8p.
- [26] SARKER M R, DVORKIN Y, ORTEGA-VAZQUEZ M A. Optimal participation of an electric vehicle aggregator in day-ahead energy and reserve markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 31(5): 3506-3515.
- [27] NEUBAUER J, WOOD E. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 257(3): 12-20.
- [28] 麻秀范, 王超, 洪潇, 等. 基于实时电价的电动汽车充放电优化策略和经济调度模型[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(增刊 1): 190-202.  
MA Xiufan, WANG Chao, HONG Xiao, et al. Optimal scheduling of charging and discharging of electric vehicle based on real time price and economic dispatch model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(S1): 190-202.
- [29] 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(增刊 1): 365-373.  
ZHUANG Huaidong, WU Hongbin, LIU Haitao, et al. Multi-objective economic dispatch of microgrid system considering electric vehicles[J]. *Transactions of China*

- Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 365-373.
- [30] 戴诗容. 电动汽车入网策略研究[D]. 成都: 西华大学, 2014.
- DAI Shirong. Research on electric vehicle network access strategy[D]. Chengdu: Xihua University, 2014.
- [31] 黄媛, 刘俊勇, 陈井锐. 计及电动汽车入网的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 24-28.
- HUANG Yuan, LIU Junyong, CHEN Jingrui. Load frequency control considering vehicle to grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 24-28.
- [32] 曹生让, 丁晓群, 王庆燕, 等. 基于反向云自适应粒子群算法的多目标无功优化[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 21-27.
- CAO Shengrang, DING Xiaoqun, WANG Qingyan, et al. Multi-objective reactive power optimization based on opposition-based learning cloud model adaptive particle swarm optimization[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 21-27.
- [33] 司徒友, 吴杰康, 郭清元, 等. 基于免疫 PSO 的新能源配电网无功多目标模糊优化[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 90-98.
- SITU You, WU Jiekang, GUO Qingyuan. Multi-objective fuzzy optimization for reactive power of distribution network based on immune particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 90-98.
- [34] 陈浩, 王健. 基于差分粒子群算法的变电站选址定容规划[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 118-122.
- CHEN Hao, WANG Jian. The optimization of substation locating and sizing based on DEPSO algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 118-122.
- [35] 鲁裕婷, 赵天乐, 都洪基, 等. 基于改进粒子群算法的含 DG 配电网无功优化[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 69-74.
- LU Yuting, ZHAO Tianle, DU Hongji, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 69-74.
- [36] 陈树, 张继中. 基于自适应均值粒子群算法的 SVM 参数优化方法[J]. 测控技术, 2018, 37(4): 6-10.
- CHEN Shu, ZHANG Jizhong. SVM parameter optimization method based on adaptive mean particle swarm optimization[J]. Measurement and Control Technology, 2018, 37(4): 6-10.

收稿日期: 2019-07-03; 修回日期: 2019-08-30

作者简介:

赵玉(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车调度策略、智能电网; E-mail: 734431651@qq.com

徐天奇(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网、新能源发电接入、微型电网; E-mail: xu.tianqi@gmail.com

李琰(1977—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统调度、智能电网及其通信系统。E-mail: liyan.hust@gmail.com

(编辑 魏小丽)