

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.020

# 基于改进累积前景理论的电动运营车充电决策模型

冯万璐<sup>1</sup>, 权轶<sup>1</sup>, 付波<sup>1</sup>, 赵楠<sup>1</sup>, 李超顺<sup>2</sup>, 陆军军<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068;

2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为准确描述电动运营车车主的非理性充电决策行为,文中建立了基于改进累积前景理论的电动运营车充电决策模型。首先,综合考虑到达时间、剩余电量和心理安全电量等因素,构建电动运营车车主在不同峰谷电价下的充电需求模型。其次,针对运营车车主对到达时间和剩余电量的心理感知差异,建立考虑风险偏好的改进累积前景理论异质参考点模型。最后,以运营车累积前景收益为评价指标,对充电决策进行评估。对武汉市电动运营车充电行为进行仿真分析,结果表明,在心理安全电量一定的前提下,心理感知价值较高的车主会提前充电,而心理感知价值较低的车主则倾向于延后充电。文中模型将风险偏好与心理感知价值相结合,可以更准确地反映运营车车主的非理性决策行为。

**关键词:**异质参考点;心理安全电量;心理感知价值;改进累积前景理论;风险偏好因子;非理性决策

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)02-0170-10

## 0 引言

随着电动汽车数量的大规模增长<sup>[1-5]</sup>,电动汽车充电行为及充电方式成为研究热点<sup>[6]</sup>。不同电动汽车用户群体呈现出不同的充电行为特征。电动运营车车主由于其工作性质,须关注电动汽车电量状态,以避免在低电量状态下行驶,出现里程焦虑<sup>[7]</sup>。现有对电动运营车车主充电行为的研究中多关注到达时间、剩余电量等客观因素且建模中多以期望效用理论(expected utility theory, EUT)为基础,假设决策者完全理性,但事实上,车主并非完全理性<sup>[8-10]</sup>,车主的决策行为由客观因素和主观感知共同决定。累积前景理论(cumulated prospect theory, CPT)的提出弥补了EUT关于理性假设的不足,在决策时会综合考虑人的风险偏好和心理感知价值(psychologically perceived value, PPV)等因素,可对违背EUT的非理性情况给出解释。

在充电决策模型建立方面,文献[11-12]对充电需求建模时均考虑了充电时间、剩余电量等客观因素,但未考虑车主主观感知的影响,无法准确反映车主的实际充电需求;文献[13]则从概率建模的角度对电动汽车充电行为进行建模分析,以充电行为的特征变量表征其充电规律性;文献[14]综合考虑出租车时间成本和电费成本对车主充电行为的影响,但未考虑车主决策时的不完全理性。

收稿日期:2022-09-13;修回日期:2022-11-19

基金项目:湖北省重点研发计划资助项目“新能源汽车动力电池安全监测大数据分析平台中试研究”(2021BGD013)

在CPT参考点设置方面,文献[15]将等待时间设置为参考点,发现人们选择出行方式会随着参考点的不同而改变,但未考虑个人风险偏好与参考点的关系;文献[16]根据决策者可接受的最早、最晚到达时间和行程时间设定3个参考点,研究决策者的出行决策行为,为参考点的设置提供了改进思路。

文中结合电动运营车车主心理安全电量的主观感知与到达时间、剩余电量等客观因素构建了充电需求模型,同时基于CPT,将风险偏好与参考点相结合,建立了考虑风险偏好的异质参考点模型,为电动运营车提供充电决策建议。通过分析研究武汉市电动运营车充电行为,验证了文中模型的有效性和准确性。

## 1 研究框架

现有研究在描述电动运营车车主的充电决策行为时,多认为车主完全理性而忽略了车主的非理性,对充电需求建模时多考虑客观因素而忽略了车主的主观感知,且在CPT参考点设置上忽略了个人风险偏好的影响。针对这些问题,文中建立了由充电需求模型、非理性决策模型、考虑风险偏好的异质参考点模型组成的基于改进CPT的电动运营车充电决策模型(decision-making model for charging of operational EVs based on adapted cumulated prospect theory, ACPT-CDM),其结构如图1所示。

(1) 充电需求模型。将客观因素与车主主观感知相结合,综合考虑心理安全电量、到达时间和剩余电量等因素,建立运营车车主在不同峰谷电价下

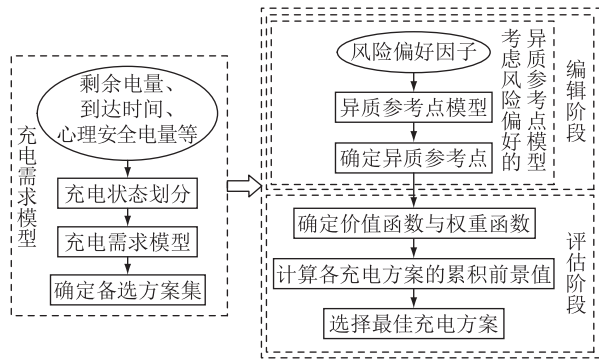


图1 ACPT-CDM框图

Fig.1 Block diagram of ACPT-CDM

的充电需求模型,以确定充电决策的备选方案集以及收益函数。

(2) 非理性决策模型。考虑车主的非理性,将CPT应用于车主充电决策建模中,建立了ACPT-CDM。CPT将不确定决策过程分为编辑阶段和评估阶段,在编辑阶段确定参考点,将结果转换为相对于参考点的收益或损失;在评估阶段,利用价值函数与权重函数对车主的充电决策进行分析与评估,选择出最佳充电方案。

(3) 考虑风险偏好的异质参考点模型。在ACPT-CDM的编辑阶段,以充电需求模型所确定的备选方案集为基础,考虑电动运营车车主PPV的差异性,将个人风险偏好与参考点相结合,对CPT参考点进行改进,建立考虑风险偏好的异质参考点模型。

## 2 充电需求模型

电动运营车每天工作时间较长,且电池容量有限,一天之内要多次充电,由于夜间充电行为较为单一,故仅考虑日间时段电动运营车充电情况。

### 2.1 影响电动汽车充电负荷特性的因素

充电开始时间和充电持续时间是影响电动运营车充电行为的关键因素。电动汽车的充电持续时间如式(1)所示。

$$T_{\text{char}} = \frac{C(B_{\text{lea}} - B)}{P_{\text{EV}}\theta_{\text{char}}} \quad (1)$$

式中: $C$ 为电动汽车电池的额定容量; $B$ 为到站时初始荷电状态(即剩余电量); $B_{\text{lea}}$ 为充电完成时电池荷电状态; $P_{\text{EV}}$ 为电动汽车的充电功率; $\theta_{\text{char}}$ 为电动汽车的充电效率。

电动运营车的开始充电时间 $t$ 取决于多种因素,包括车辆的类型和车主的个人行为等。之前的研究中将车辆最后一次出行的结束时刻的分布通过极大似然估计近似为正态分布<sup>[17]</sup>,且将其视为开始充电时间,表示为:

$$f_s(t) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}} \quad (2)$$

式中: $\mu_s$ 为 $t$ 的期望; $\sigma_s$ 为标准差。

### 2.2 充电状态划分

综合来看,电动运营车某一特定时刻的充电选择并不唯一,不同的剩余电量、到达时间以及心理安全电量等均会影响车主的充电概率<sup>[18]</sup>。峰平电价亦是重要因素,故根据峰平电价设定3种充电状态用以描述车主不同的充电行为,后文将电价峰时段简称为峰时段,将电价平时段简称为平时段。

状态一:在峰时段到达,且充电持续时间小于峰时段剩余时间,此时车主可选择当前时刻在峰时段充电,或选择未来某时刻在平时段充电;

状态二:在峰时段到达,且充电持续时间大于峰时段剩余时间,此时车主可选择当前时刻跨时段充电或选择未来某时刻在平时段充电;

状态三:在平时段到达,在平时段充电。

文中设定到达时间与开始充电时间等价,将车主充电决策分为当前时刻充电(如峰时段到达,决策结果为峰时段充电)和未来某时刻充电(如峰时段到达,决策结果为平时段充电)。基于上述考虑,对任意时刻而言,所计算的充电行为来自于选择在当前时刻直接充电的车主,而到达但未选择当前时刻充电的车主将在未来某时刻纳入模型计算。

电动运营车车主所属的充电状态取决于充电截止时间 $t_{\text{end}}$ , $t_{\text{end}}$ 与 $T_{\text{char}}$ 的关系如式(3)所示。

$$T_{\text{char}} = t_{\text{end}} - t \quad (3)$$

结合式(1)可知,当 $t$ 、 $C$ 、 $B_{\text{lea}}$ 、 $P_{\text{EV}}$ 、 $\theta_{\text{char}}$ 为常量时, $t_{\text{end}}$ 与 $B$ 符合正比例关系,即:

$$B = -\frac{P_{\text{EV}}\theta_{\text{char}}}{C}t_{\text{end}} + \frac{P_{\text{EV}}\theta_{\text{char}}}{C}t + B_{\text{lea}} \quad (4)$$

文中设定研究时段为 $(0, t_{\text{max}})$ ,其中 $(0, t_0)$ 为峰时段, $(t_0, t_{\text{max}})$ 为平时段。令最小剩余电量 $B_{\text{min}}$ 充至最大电量 $B_{\text{max}}$ 所需的充电时间为 $T_{\text{max}}$ ,到达时间 $t=0$ 、 $t=t_0-T_{\text{max}}$ 、 $t=t_0$ 为所研究不同时段边界时刻。

当 $t=0$ 时,若剩余电量 $B$ 为 $B_{\text{min}}$ ,则充电截止时间 $t_{\text{end}}$ 为 $T_{\text{max}}$ ;若剩余电量 $B$ 为 $B_{\text{max}}$ ,则充电截止时间 $t_{\text{end}}$ 为0。将点 $a_0(T_{\text{max}}, B_{\text{min}})$ 和点 $b_0(0, B_{\text{max}})$ 代入式(4)可得电动运营车在时刻0到达时充电截止时间 $t_{\text{end}}$ 与剩余电量 $B$ 的关系为:

$$B = \frac{B_{\text{min}} - B_{\text{max}}}{T_{\text{max}}}t_{\text{end}} + B_{\text{max}} \quad (5)$$

当 $t=t_0-T_{\text{max}}$ 时,若 $B$ 为 $B_{\text{min}}$ ,则 $t_{\text{end}}$ 为 $t_0$ ;若 $B$ 为 $B_{\text{max}}$ ,则 $t_{\text{end}}$ 为 $t_0-T_{\text{max}}$ 。将点 $c_0(t_0, B_{\text{min}})$ 和点 $d_0(t_0-T_{\text{max}}, B_{\text{max}})$ 代入式(4)可得电动运营车在时刻 $t_0-$

$T_{\max}$  到达时  $t_{\text{end}}$  与  $B$  的关系为:

$$B = \frac{B_{\min} - B_{\max}}{T_{\max}} t_{\text{end}} + B_{\min} - \frac{B_{\min} - B_{\max}}{T_{\max}} t_0 \quad (6)$$

同理,当  $t=t_0$  时,可得点  $e_0(t_0+T_{\max}, B_{\min})$  和点  $f_0(t_0, B_{\max})$ , 将点  $e_0$  与点  $f_0$  代入式(4)可得电动运营车在时刻  $t_0$  到达时  $t_{\text{end}}$  与  $B$  的关系为:

$$B = \frac{B_{\min} - B_{\max}}{T_{\max}} t_{\text{end}} + B_{\max} - \frac{B_{\min} - B_{\max}}{T_{\max}} t_0 \quad (7)$$

比较式(5)、式(6)和式(7)可知,  $t_{\text{end}}$  与  $B$  存在着线性关系,其斜率与  $B$  的上下边界及  $T_{\max}$  有关,截距与到达时间  $t$  有关。为了更直观地表示  $B$  与  $t_{\text{end}}$  之间的关系,在以  $t_{\text{end}}$  为横轴,  $B$  为纵轴的平面坐标系中绘制上述线段  $l_{a_0b_0}$ 、 $l_{c_0d_0}$ 、 $l_{e_0f_0}$ , 如图2所示。可以看出3条线段相互平行,且当  $B_{\min} < B < B_{\max}$  时存在平行四边形区域  $a_0b_0d_0c_0$  和平行四边形区域  $c_0d_0f_0e_0$ 。结合充电状态进行分析,区域  $a_0b_0d_0c_0$  里到达的车主均为状态一,区域  $c_0d_0f_0e_0$  里到达的车主同时存在状态一和状态二。故图2为充电状态分析图,描述了到达时间、剩余电量、充电截止时间与充电状态间的关系。

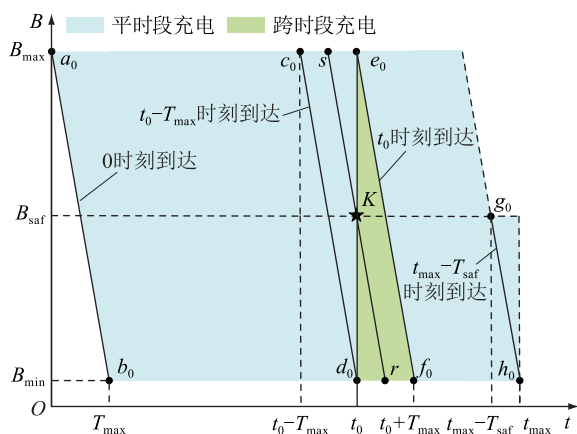


图2 充电状态分析

Fig.2 Analysis of charging state

在区域  $c_0d_0f_0e_0$  中,当  $t_{\text{end}} < t_0$  时,充电状态为状态一,当  $t_{\text{end}} > t_0$  时,充电状态为状态二。 $l_{sr}$  为该区域内任一线段,且总会与直线  $t_{\text{end}} = t_0$  存在交点  $K$ ,以  $K$  点为分界点,  $K$  点上方为状态一,  $K$  点下方为状态二,通过  $K$  点可以区分状态一与状态二。令式(4)中  $t_{\text{end}} = t_0$ , 可得  $t_0 - T_{\max} < t < t_0$  时,  $B$  与  $t$  的关系为:

$$B = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{T_{\max}} t + B_{\max} - \frac{B_{\max} - B_{\min}}{T_{\max}} t_0 \quad (8)$$

由式(8)可绘制充电状态划分图,如图3所示。线段  $l_M$  可有效将状态一和状态二划分,以  $M$  点为例,车主  $t_M$  时刻到达时,剩余电量高于  $B_M$  时为状态一;当剩余电量低于  $B_M$  时为状态二。同理,在任意

时刻均可通过该直线段有效地将该时段内混杂的2种状态分开。

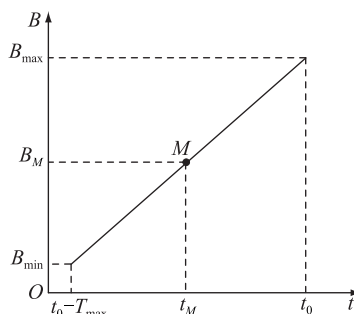


图3 充电状态划分

Fig.3 Division of charging state

### 2.3 心理安全电量模型

每个电动运营车车主对其剩余电量都会有一个心理预期值,文中将其视为心理安全电量,用  $B_{\text{saf}}$  表示。当到达时的剩余电量高于  $B_{\text{saf}}$  时,车主会选择充电;低于  $B_{\text{saf}}$  时,车主会选择充电,并在电量达到  $B_{\text{saf}}$  时停止充电。车主在运营高峰期可获得较高收益,当车主在运营高峰开始时刻  $t_{\max}$  前到达时,考虑车主将电量充至  $B_{\max}$  耗时较长,为了避免错过运营高峰期的大客流,设定大部分车主将电量充至心理安全电量  $B_{\text{saf}}$  便会离开充电站;而部分车主因某些不可控因素在  $t_{\max}$  前无法充至  $B_{\text{saf}}$ ,会导致其错过部分运营高峰期。

假设  $B$  由  $B_{\min}$  充至  $B_{\text{saf}}$  所需的充电时间为  $T_{\text{saf}}$ , 则当  $t = t_{\max} - T_{\text{saf}}$  时,若  $B = B_{\min}$ , 则  $t_{\text{end}} = t_{\max}$ ; 若  $B = B_{\text{saf}}$ , 则  $t_{\text{end}} = t_{\max} - T_{\text{saf}}$ 。将点  $g_0(t_{\max} - T_{\text{saf}}, B_{\text{saf}})$  和点  $h_0(t_{\max}, B_{\min})$  代入式(4)可得运营车到达时刻为  $t_{\max} - T_{\text{saf}}$  时  $t_{\text{end}}$  与  $B$  的关系,如图2中线段  $l_{g_0h_0}$  所示。令式(4)中  $t_{\text{end}} = t_{\max}$ , 则可得到  $t_{\max} - T_{\text{saf}} < t < t_{\max}$  时,  $B$  与  $t$  之间的关系,即:

$$B = \frac{B_{\text{saf}} - B_{\min}}{T_{\text{saf}}} t - \frac{(B_{\text{saf}} - B_{\min})t_{\max}}{T_{\text{saf}}} + B_{\text{saf}} \quad (9)$$

由式(9)可绘制心理安全电量模型图,如图4所示。以车主  $t_N$  时刻到达为例,若剩余电量高于  $B_N$ , 车主可在  $t_{\max}$  前将剩余电量充至  $B_{\text{saf}}$ ; 若剩余电量低于  $B_N$ , 车主充至  $B_{\text{saf}}$  将会错过部分运营高峰期。

### 2.4 充电方案

以上文所设定的3种充电状态为基础设置3种充电方案。方案一:只在峰时段充电,即车主峰时段到达,且充电时间小于峰时段剩余时间;方案二:只在平时段充电,即车主峰时段到达,且充电时间小于峰时段剩余时间或车主平时段到达;方案三:只在跨时段充电,即车主峰时段到达,但充电时间大于峰时段剩余时间。

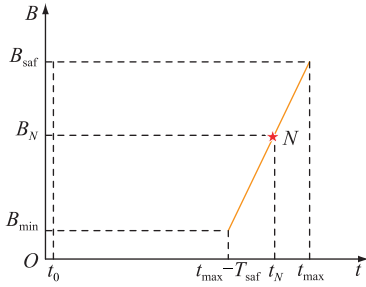


图4 心理安全电量模型

Fig.4 Model of psychological safety power

## 2.5 收益函数

针对上述充电方案,运营车收入函数可定义为:

$$Y_{ij} = E - J_1 - J_2 \quad (10)$$

式中: $Y_{ij}$ 为充电方案 $j$ 下第 $i$ 种随机场景的实际收益, $j=1,2,3$ ;  $E$ 为全天的总收益; $J_1$ 为充电费用; $J_2$ 为客单损失。3种方案的收益如下。

(1) 运营车车主选择方案一的收益(收益一):

$$Y_{i1} = p_1 T_1 q_1 + p_2 T_2 q_2 - T_{\text{char}} p_1 q_1 - (T_{\text{char}} P_{\text{EV}} \theta_{\text{char}} / 1000) S_1 \quad (11)$$

(2) 运营车车主选择方案二的收益(收益二):

$$Y_{i2} = p_1 T_1 q_1 + p_2 T_2 q_2 - T_{\text{char}} p_2 q_2 - (T_{\text{char}} P_{\text{EV}} \theta_{\text{char}} / 1000) S_2 \quad (12)$$

(3) 运营车车主选择方案三的收益(收益三):

$$Y_{i3} = p_1 T_1 q_1 + p_2 T_2 q_2 - T_1 p_1 q_1 - (T_1 P_{\text{EV}} \theta_{\text{char}} / 1000) S_1 - T_2 p_2 q_2 - (T_2 P_{\text{EV}} \theta_{\text{char}} / 1000) S_2 \quad (13)$$

式中: $p_1$ 为峰时段客流量; $p_2$ 为平时段客流量; $T_1$ 为峰时段充电时间; $T_2$ 为平时段充电时间; $q_1$ 为峰时段平均客单价; $q_2$ 为平时段平均客单价; $S_1$ 为峰时段电价; $S_2$ 为平时段电价。

## 3 基于改进 CPT 的充电决策模型

在 CPT 的编辑阶段,考虑参考点的异质性,引入风险偏好对其进行改进;在评估阶段,建立用于描述各备选方案可能发生结果的价值函数和累积权重函数,并进行累积前景值计算,作出充电决策。

### 3.1 考虑风险偏好的异质参考点模型

在 CPT 中,备选充电方案的收益或损失根据参考点划分,不同的参考点对应完全不同的价值函数关系,故参考点会直接影响充电决策。

#### 3.1.1 PPV 模型

$I_0$ 为车主对选择不同充电方案的最大期望效用,即收益期望值:

$$I_0 = U(x) = \sum (Y_{ij}, p_{ij}) \quad (14)$$

式中: $U(x)$ 为期望效用函数; $p_{ij}$ 为充电方案 $j$ 下第 $i$

种随机场景相对应的概率。

不同车主具有不同的期望效用<sup>[19]</sup>,车主对到达时间和电池的剩余电量的心理感知会影响其充电状态,进而会影响车主的 PPV。一般来说,车主的到达时间越早,可供选择的充电方案越多,其 PPV 越高;反之,车主的到达时间越晚,可供选择的充电方案越少,其 PPV 越低。此外,车主剩余电量越大,PPV 越高;反之则 PPV 越低,故简单以  $I_0$  作为车主收益的参考点并不准确。

文中设定车主到达时的剩余电量  $B \in (B_{\min}, B_{\text{saf}})$ ,结合 2.2 节关于充电状态的分析可知,车主在  $t_0 - T_{\text{max}}$  时刻前到达时,其充电状态为状态一。根据图 3 可知,式(8)对应的线段可将将在  $(t_0 - T_{\text{max}}, t_0)$  内到达的车主划分为状态一和状态二,其中,位于线段上方的为状态一,位于线段下方的为状态二。车主在  $t_0$  时刻之后到达时,其充电状态为状态三。

如图 5 所示,将直线  $B = B_{\text{saf}}, t = t_0 - T_{\text{max}}$ 、式(8)、 $t = t_0, t = t_{\text{max}}$  绘制于以  $t$  为横轴,  $B$  为纵轴的坐标系中,可得 4 个不同的区域。将这些区域依次命名为区间 1、2、3、4。区间 1 对应  $(0, t_0 - T_{\text{max}})$  内为状态一的车主;区间 2 对应  $(t_0 - T_{\text{max}}, t_0)$  内为状态一的车主;区间 3 对应  $(t_0 - T_{\text{max}}, t_0)$  内为状态二的车主;区间 4 对应  $(t_0, t_{\text{max}})$  内为状态三的车主。

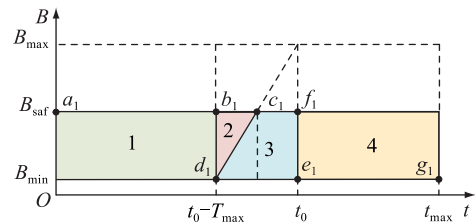


图5 PPV模型

Fig.5 Model of PPV

在上述区间中,当车主到达时间最早且剩余电量最多时,其 PPV 为极大值,即车主在此充电条件下的最大期望效用  $I_{\text{max}}$ ,例如区间 1 的点  $a_1$ ;当车主到达时间最晚且剩余电量最少时,其 PPV 为极小值,即车主在此充电条件下的最小期望效用  $I_{\text{min}}$ ,例如区间 1 的点  $d_1$ 。同理,点  $b_1$ 、点  $c_1$  和点  $f_1$  分别为区间 2、区间 3 和区间 4 的极大值;点  $d_1$ 、点  $e_1$  和点  $g_1$  分别为区间 2、区间 3 和区间 4 的极小值。

PPV 模型根据充电状态对车主进行划分,考虑了车主在不同的到达时间、剩余电量和心理安全电量下 PPV 的差异,较好地分析描述了车主对期望收益的心理感知。

#### 3.1.2 考虑风险偏好的异质参考点模型

以 PPV 模型为基础,将各区间的  $I_{\text{max}}$  和  $I_{\text{min}}$  作为

阈值点,引入风险偏好因子 $\mu(0<\mu<1)$ ,建立了考虑风险偏好的异质参考点模型。对于 $\mu$ 而言,当 $0<\mu<0.5$ 时,车主表现为风险规避;当 $0.5<\mu<1$ 时,车主表现为风险追求;当 $\mu=0.5$ 时,车主表现为风险中立。 $I_k$ 为区间 $k$ 中车主的PPV, $k=1,2,3,4$ ,定义异质参考点 $I_k$ 为:

$$I_k = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min})\mu \quad (15)$$

考虑风险偏好的异质参考点模型综合考虑了PPV的差异和风险偏好对车主收益期望值的影响,考虑了参考点的异质性,实现了对车主未来决策更准确的评估。

### 3.2 累积前景值计算

(1) 价值函数。经典价值函数模型为:

$$v(Y_{ij}) = \begin{cases} (Y_{ij} - I_k)^\alpha & Y_{ij} - I_k \geq 0 \\ -\lambda(I_k - Y_{ij})^\beta & Y_{ij} - I_k < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $v(Y_{ij})$ 为车主在充电方案 $j$ 下第 $i$ 种随机场景的主观价值; $\alpha, \beta$ 为车主对风险的灵敏度; $\lambda$ 为损失规避系数。大量实验数据分析可得,令 $\alpha = \beta = 0.88, \lambda = 2.25^{[20]}$ 较为合适。

(2) 权重函数。文中采用Yversky和Kahneman提出的权重函数<sup>[21]</sup>。

当车主面对收益时:

$$\omega^+(p_{ij}) = \frac{p_{ij}^\gamma}{[p_{ij}^\gamma + (1 - p_{ij}^\gamma)^\gamma]^{1/\gamma}} \quad (17)$$

当车主面对损失时:

$$\omega^-(p_{ij}) = \frac{p_{ij}^\delta}{[p_{ij}^\delta + (1 - p_{ij}^\delta)^\delta]^{1/\delta}} \quad (18)$$

式中: $\omega^+(p_{ij})$ 为车主面对收益时的主观概率权重; $\omega^-(p_{ij})$ 为车主面对损失时的主观概率权重; $\gamma = 0.61, \delta = 0.69$ 时<sup>[22]</sup>,与经验数据较一致。

CPT的决策权重函数 $\pi_{ij}^+$ 和 $\pi_{ij}^-$ 可以定义如下:

$$\pi_{ij}^+ = \omega^+(p_{ij} + \dots + p_{nj}) - \omega^+(p_{(i+1)j} + \dots + p_{nj}) \quad 0 \leq i \leq n - 1 \quad (19)$$

$$\pi_{ij}^- = \omega^-(p_{(-m)j} + \dots + p_{ij}) - \omega^-(p_{(-m)j} + \dots + p_{(i-1)j}) \quad 1 - m \leq i \leq 0 \quad (20)$$

式中: $\pi_{ij}^+$ 为正的累积决策权重函数,即决策者面临收益时的累积决策权重函数; $\pi_{ij}^-$ 为负的累积决策权重函数,即决策者面临损失时的累积决策权重函数; $n$ 为每种充电方案下车主感受到收益时的可能结果; $m$ 为每种充电方案下车主感受到损失时的可能结果。 $\omega^+$ 和 $\omega^-$ 是严格的增函数,且满足:

$$\omega^+(0) = \omega^-(0) = 0 \quad (21)$$

$$\omega^+(1) = \omega^-(1) = 1 \quad (22)$$

(3) 累积前景值计算。

$$V_j = V_j^+ + V_j^- \quad (23)$$

$$V_j^+ = \sum \pi_{ij}^+ v(Y_{ij}) \quad Y_{ij} - I_k \geq 0 \quad (24)$$

$$V_j^- = \sum \pi_{ij}^- v(Y_{ij}) \quad Y_{ij} - I_k < 0 \quad (25)$$

式中: $V_j^+$ 为方案 $j$ 下正向累积前景值; $V_j^-$ 为方案 $j$ 下负向累积前景值; $V_j$ 为实际的综合累积前景值。运营车车主通常倾向选择综合累积前景值最大的充电方案作为最优充电选择。

## 4 案例分析

### 4.1 案例参数设置

按照武汉市峰谷电价时段划分情况,可得09:00—14:00为峰时段,14:00—17:00为平时段,且武汉市运营车的运营高峰期为07:00—10:00和17:00—20:00。显然运营车车主会尽量避开电价高峰期和运营高峰期进行充电,故将研究时间设定为09:00—17:00。文中使用试值法确定时间参数,结合市场调研结果,最终确定正态分布的均值为14:00,标准差为3。

对于数据集内的时间信息,将09:00记为时刻0,09:30记为时刻0.5。对于电量数据,将其记为小数形式,即0.9代表90%的电量。文中设定剩余电量服从正态分布,即 $B \sim N(0.5, 0.25)$ ,且 $0.1 < B < B_{\text{sat}}$ ,当电量达到0.9时充电完成;设定到达时间 $t$ 服从正态分布,即 $t \sim N(5, 9)$ ,且 $t \in (0, 8)$ 。

经调研,BYDE6型电动汽车为武汉市常见运营车型号,其电池容量为 $45 \text{ kW} \cdot \text{h}^{[23]}$ ,且武汉市通用充电桩充电功率为 $35 \text{ kW}^{[24]}$ ,充电效率 $\theta_{\text{char}}$ 为 $0.95^{[25]}$ 。表1为峰、平时段部分参数的设定,其中平时电价及平均客单价均参照武汉市价格。

表1 参数设定

Table 1 Parameter configuration		
参数	峰时段	平时段
客流量/人次	$p_1$ (泊松分布, $\lambda=3$ )	$p_2$ (泊松分布, $\lambda=2$ )
平均客单价/元	30	20
电价/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	3S <sub>2</sub>	1.109 4
剩余电量	$B \sim N(0.5, 0.25)$	
到达时间	$t \sim N(5, 9)$	

参数设定完成后,图2转换为图6,剩余电量由0.1充至0.9需要1.083 h,时刻5为峰时段结束时刻。

由PPV模型可计算得到3个区间的PPV极值点,如表2所示,用于ACPT-CDM的异质参考点计算。在EUT模型中,运营车车主通过比较各项充电决策的收益期望值进行充电决策,车主更偏向期望

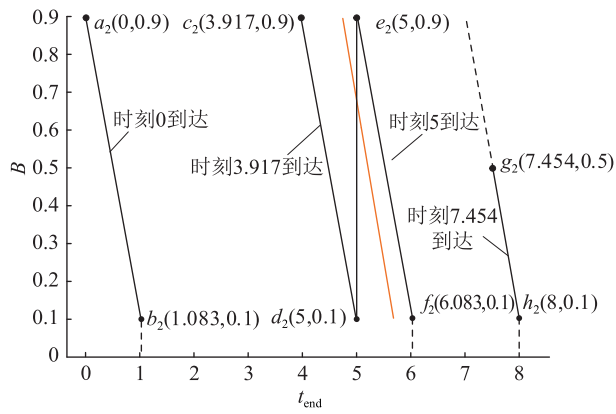


图6 实例示意

Fig.6 Schematic diagram of example

值较大的充电决策。在 CPT 模型中以收益期望值为参考点。

表2 PPV 极值点

Table 2 Psychologically perceived value extreme points

区间	方案一		方案二		方案三	
	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值	极大值
区间 1	171.32	260.77	240.84	379.04	无	无
区间 2	171.32	361.67	240.84	404.10	无	无
区间 3	无	无	248.65	372.18	280.30	297.52

### 4.2 案例设计

通过设计 3 个案例场景验证模型的有效性,对不同到达时间的车主的充电决策进行对比分析。车主平时段到达的充电决策较固定,将其作为辅助决策,案例将重点研究峰时段到达车主的决策。文中利用 Excel 内置函数和 VBA 宏程序进行有关期望效用值和累积前景值的计算,并使用 Matlab 2016b 绘制不同情况下车主的充电决策图,图中期望效用值和累积前景值均使用缩小相同倍数后的值。

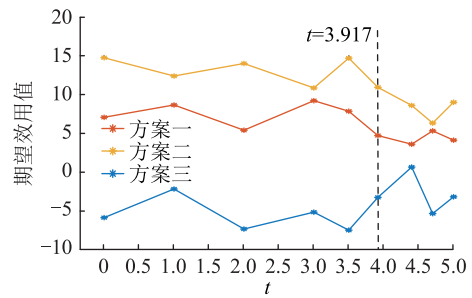
(1) 不同模型中运营车车主的充电决策分析。设定峰时段的电价为平时段的 3 倍,对 EUT、CPT 和 ACPT-CDM 中风险追求型车主在剩余电量  $B \sim N(0.5, 0.25)$ ,到达时间  $t \sim N(5, 9)$  条件下的充电决策偏好进行建模分析,得到 3 种模型中运营车车主的充电决策。表 3 与图 7 为上述充电决策的不同展示形式。

由表 3 和图 7 可知,当车主属于区间 1 和区间 2 时,EUT、CPT 和 ACPT-CDM 中车主决策相同,均选择方案二平时段充电;当车主属于区间 3 时,EUT 模型中车主充电决策不变,在 CPT 模型中,车主决策在时刻 4.7 发生变化,选择方案三跨时段充电,在 ACPT-CDM 中,车主决策在时刻 4.4 发生变化,选择方案三。

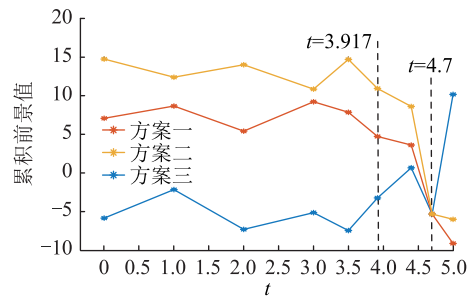
表3 模型结果对比

Table 3 Comparison of results of different models

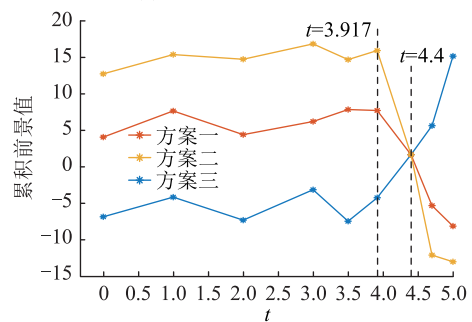
区间	$t$	EUT	CPT	ACPT-CDM
区间 1	$[0, 3.917)$	方案二	方案二	方案二
区间 2	$[3.917, 4.46)$	方案二	方案二	方案二
区间 3	$[4.4, 4.2)$	方案二	方案二	方案二
	$[4.2, 4.4)$	方案二	方案二	方案二
	$[4.4, 4.7)$	方案二	方案二	方案三
	$[4.7, 4.8)$	方案二	方案三	方案三
	$[4.8, 5]$	方案二	方案三	方案三



(a) EUT模型中车主充电决策



(b) CPT模型中车主充电决策



(c) ACPT-CDM车主充电决策

图7 3种模型的充电决策

Fig.7 Charging decisions under three models

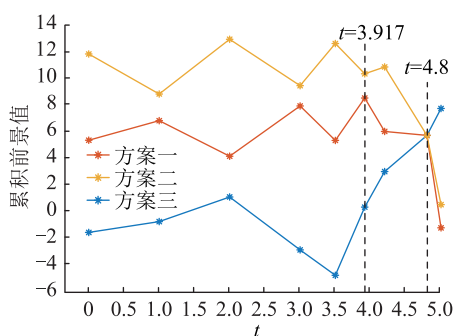
决策结果显示,EUT 默认车主完全理性,从客观角度出发,忽略了车主主观感知的影响。CPT 和 ACPT-CDM 考虑了车主的有限理性,而 CPT 模型并未考虑车主的 PPV,而 ACPT-CDM 将人的 PPV 和风险态度纳入分析,能够更好地反映人的非理性决策行为。

(2) 不同  $B_{sat}$  的运营车车主的充电决策分析。设定峰时段的电价为平时段的 3 倍,将 ACPT-CDM

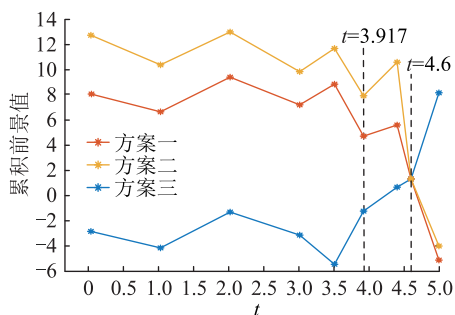
中的心理安全电量分别设定为 0.3、0.5、0.7, 比较稳健型车主在剩余电量  $B \sim N(0.5, 0.25)$ 、到达时间  $t \sim N(5, 9)$  条件下的充电决策偏好, 得到了 3 种心理安全电量下运营车车主的充电决策。表 4 与图 8 为上述充电决策的不同展示形式。

表 4 不同心理安全电量决策结果  
Table 4 Decision results under different psychological safety electricity

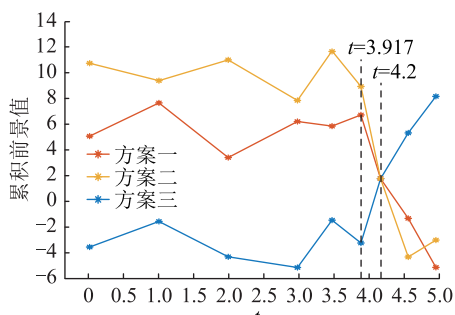
区间	$t$	$B_{saf}=0.3$	$B_{saf}=0.5$	$B_{saf}=0.7$
区间 1	$[0, 3.917)$	方案二	方案二	方案二
区间 2	$[3.917, 4.458 7)$	方案二	方案二	方案二
	$[3.917, 4.2)$	方案二	方案二	方案二
	$[4.2, 4.4)$	方案二	方案二	方案三
区间 3	$[4.4, 4.6)$	方案二	方案二	方案三
	$[4.6, 4.8)$	方案二	方案三	方案三
	$[4.8, 5]$	方案三	方案三	方案三



(a)  $B_{saf}=0.3$  的车主充电决策



(b)  $B_{saf}=0.5$  的车主充电决策



(c)  $B_{saf}=0.7$  的车主充电决策

图 8 不同心理安全电量的充电决策  
Fig.8 Charging decisions under different safety electricity

由表 4 和图 8 可知, 运营车车主所选择的充电

时间集中在时刻 4.5 附近。当车主属于区间 1 和区间 2 时, 选择方案二平时段充电; 当车主属于区间 3 时,  $B_{saf}=0.3$  的车主决策在时刻 4.8 发生变化, 选择方案三跨时段充电;  $B_{saf}=0.5$  的车主在时刻 4.6 选择方案三;  $B_{saf}=0.7$  的车主在时刻 4.2 选择方案三。

决策结果显示,  $B_{saf}$  较高的车主对剩余电量具有较高的敏感度, 会倾向于选择提前充电, 而  $B_{saf}$  较低的车主则与之相反。这是由于  $B_{saf}$  较高, 车主的安全感较弱, 当剩余电量低于  $B_{saf}$  时, 车主产生电量焦虑, 故选择提前充电; 而  $B_{saf}$  越低, 车主的安全感越强, 对剩余电量敏感度越低, 故会考虑峰时段较高的充电成本, 进而会选择推迟充电。

(3) 异质风险偏好运营车车主的充电决策分析。设定峰时段的电价为平时段的 3 倍, 在 ACPT-CDM 中将风险偏好因子  $\mu$  分别设定为 0.2、0.5、0.8, 分析了该模型中在  $B_{saf}=0.5$ , 剩余电量  $B \sim N(0.5, 0.25)$ , 到达时间  $t \sim N(5, 9)$  条件下车主的充电决策偏好, 此外, 还在相同条件下对 CPT 模型中运营车车主的充电决策行为进行了建模分析。表 5 与图 9 为上述充电决策的不同展示形式。

表 5 不同风险偏好决策结果

Table 5 Decision results under different risk preferences

区间	$t$	$\mu=0.2$	$\mu=0.5$	$\mu=0.8$	CPT
区间 1	$[0, 3.917)$	方案二	方案二	方案二	方案二
区间 2	$[3.917, 4.458 7)$	方案二	方案二	方案二	方案二
	$[3.917, 4.4)$	方案二	方案二	方案二	方案二
	$[4.4, 4.6)$	方案二	方案二	方案三	方案二
区间 3	$[4.6, 4.7)$	方案二	方案三	方案三	方案二
	$[4.7, 4.8)$	方案二	方案三	方案三	方案三
	$[4.8, 5]$	方案三	方案三	方案三	方案三

由表 5 和图 9 可知, 当车主属于区间 1 和区间 2 时, 车主均选择方案二平时段充电。当车主属于区间 3 时, 在 ACPT-CDM 中, 风险规避型车主 ( $\mu=0.2$ ) 充电决策在时刻 4.8 发生变化, 选择方案三; 稳健型车主 ( $\mu=0.5$ ) 在时刻 4.6 选择方案三; 风险追求型车主 ( $\mu=0.8$ ) 在时刻 4.4 选择方案三。而在 CPT 模型中, 车主在时刻 4.7 选择方案三, 不会受到风险偏好因子的影响。

决策结果显示, 对比稳健型车主, 风险追求型车主往往选择提前充电, 风险规避型车主会推迟充电, 这是因为风险追求型车主 PPV 较高, 倾向于承担高风险, 追求高收益; 而风险规避型车主 PPV 较低, 倾向于规避风险, 降低损失。对比 CPT 模型的决策结果, ACPT-CDM 较好地拓展了 CPT 模型对风险态度的刻画。

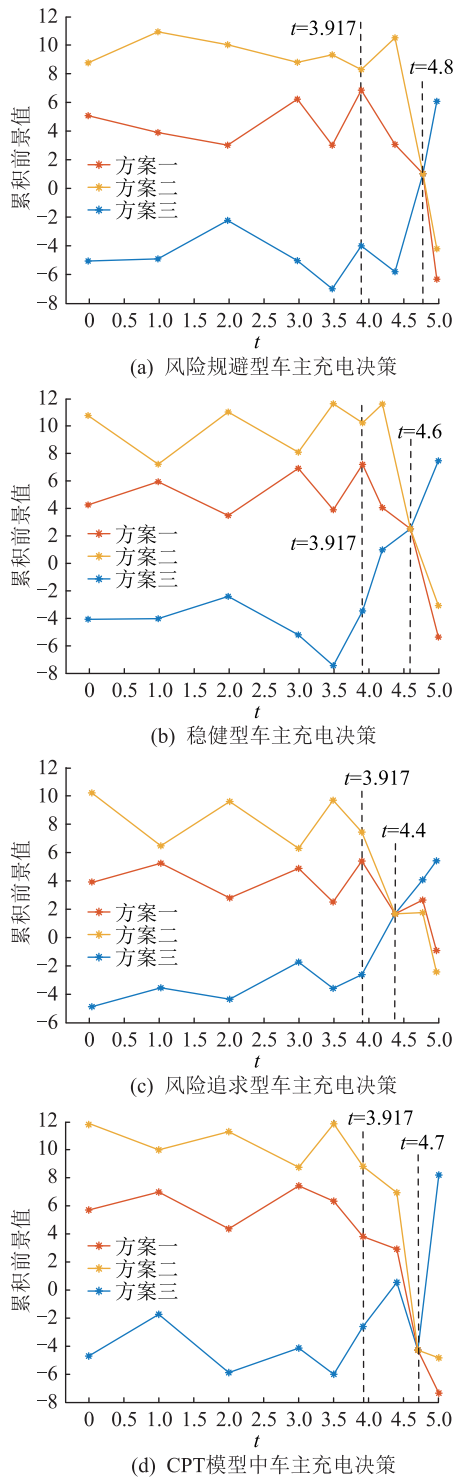


图9 不同风险偏好的充电决策  
Fig.9 Charging decisions under different risk preferences

实际运营中,不同车主的心理安全电量存在差异,当其变化时,不同风险偏好的车主的充电决策会相应变化。当车主的心理安全电量较低时,风险追求型车主 PPV 较高,故车主提前充电的选择会整体性前移;当车主的心理安全电量较高时,风险规避型车主 PPV 较低,故车主推后充电的选择会整体性后移。

案例结果表明,不同心理安全电量下,不同风险偏好的车主将有不同的充电决策,故在考虑车主的充电决策行为时应综合考虑风险态度与 PPV 的影响。

## 5 结语

基于 CPT,综合考虑到达时间、剩余电量和心理安全电量等因素对非理性充电决策行为进行建模,并基于武汉市电动运营车充电数据进行模型验证,主要结论如下:

(1) 文中提出的 ACPT-CDM 可以较好地描述非理性车主的充电决策行为,为研究大规模电动汽车的充电行为提供思路。

(2) 心理安全电量较低时,PPV 较高的车主提前充电的选择会整体性前移;心理安全电量较高时,PPV 较低的车主推后充电的选择会整体性后移。案例结果表明将风险态度与 PPV 相结合可以更准确地反映运营车车主的非理性决策行为。

(3) 运营车车主日间充电行为为集中在运营低谷期,符合充电决策规避运营高峰期的经验性结论,案例结果较好地反映了决策者趋利避害的主动性决策特性。

## 参考文献:

- [1] 齐宁,程林,田立亭,等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化,2020,44(10):193-207.  
QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10):193-207.
- [2] ZHOU Jianli, WU Yunna, WU Chenghao, et al. A hybrid fuzzy multi-criteria decision-making approach for performance analysis and evaluation of park-level integrated energy system [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 201:112-134.
- [3] 李雪梅,段晨悦,许鑫,等. 电动汽车充电用户行为特征研究[J]. 中国市场,2018(13):125-127.  
LI Xuemei, DUAN Chenyue, XU Xin, et al. Study on behavior characteristics of electric vehicle charging users[J]. China Market, 2018(13):125-127.
- [4] 郭戈,徐涛,韩英华,等. 电动汽车时代的电网-交通网协同优化综述[J]. 控制与决策,2021,36(9):2049-2062.  
GUO Ge, XU Tao, HAN Yinghua, et al. A survey of cooperative optimization of traffic-grid networks in the era of electric vehicles[J]. Control and Decision, 2021, 36(9):2049-2062.
- [5] 杨烨,谭忠富,焦港欣. 基于网联数据的电动车快速充电影响因素分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2020,20(5):86-92.  
YANG Ye, TAN Zhongfu, JIAO Gangxin. Analysis of factors influencing fast charging behavior based on data of connected electric vehicles[J]. Journal of Transportation Systems Engineer-



- ing and Information Technology, 2020, 20(5): 86-92.
- [6] 阳洋,李奇,蒲雨辰,等. 考虑电动汽车充电方式的热-电-氢耦合孤岛综合能源系统优化配置[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3869-3880.  
YANG Yang, LI Qi, PU Yuchen, et al. Optimal configuration of CHHP island IES considering different charging modes of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3869-3880.
- [7] 李浩,陈钰,俞璐,等. 实际数据驱动的纯电动汽车途中充电潜在偏好行为分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 104-113.  
LI Hao, CHEN Yu, YU Lu, et al. Empirical data driven approach for modeling the latent en-route charging preference behavior of battery electric vehicle users[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(1): 104-113.
- [8] 吴赋章,杨军,林洋佳,等. 考虑用户有限理性的电动汽车时空行为特性[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1563-1574.  
WU Fuzhang, YANG Jun, LIN Yangjia, et al. Research on spatiotemporal behavior of electric vehicles considering the users' bounded rationality[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1563-1574.
- [9] 王增强,陈振颂,蒲云. 基于累积前景理论的无人机传感器产品概念方案开发决策[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-22 [2022-09-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211022.1531.020.html>.  
WANG Zengqiang, CHEN Zhensong, PU Yun. Decision-making for product conceptual alternatives development of unmanned aerial vehicles sensor based on cumulative prospect theory [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems: 1-22 [2022-09-13]. <http://kns.cnki.net/kc/detail/11.5946.TP.20211022.1531.020.html>.
- [10] 张雪妍,贺锋. 基于累积前景理论的组合出行交通分配模型[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(3): 91-96.  
ZHANG Xueyan, HE Feng. Traffic assignment model with combined modes based on cumulative prospect theory[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(3): 91-96.
- [11] 邓昌棉,张勇. 基于数据驱动的电动出租车充电站规划方法研究[J]. 森林工程, 2020, 36(3): 77-85.  
DENG Changmian, ZHANG Yong. Research on data-driven electric taxi charging station planning method[J]. Forest Engineering, 2020, 36(3): 77-85.
- [12] 田晟,曾莉莉. 基于改进核密度估计的电动出租车快速充电行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(4): 221-229.  
TIAN Sheng, ZENG Lili. Fast charging behavior of electric taxi based on improved kernel density estimation [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(4): 221-229.
- [13] 黄松渝. 数据驱动的电动汽车充电行为和充电需求建模分析[D]. 杭州:浙江大学, 2020.  
HUANG Songyu. Data-driven modeling and analysis of electric vehicle charging behaviors and demands[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [14] 叶文浩,吕凤仪,龙雪梅,等. 一种考虑时间和电价的电动出租车充电推荐策略[J/OL]. 电测与仪表: 1-8 [2022-09-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.2020112-4.0914.006.html>.  
YE Wenhao, LYU Fengyi, LONG Xuemei, et al. A charging recommendation strategy for electric taxi considering time and electricity price [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-8 [2022-09-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201124.0914.006.html>.
- [15] 郭赋斌. 基于累积前景理论的出行者出行方式选择行为研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2020.  
GUO Fubin. Research on traveler's travel mode choice behaviors based on cumulative prospect theory [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.
- [16] 王顺,杨欢,况爱武,等. 基于累积前景理论的通勤出行联合决策模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 58-65.  
WANG Shun, YANG Huan, KUANG Aiwu, et al. Joint decision model of commuting travel based on cumulative prospect theory [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 58-65.
- [17] 李含玉,杜兆斌,陈丽丹,等. 基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及V2G评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 88-96.  
LI Hanyu, DU Zhaobin, CHEN Lidan, et al. Trip simulation based charging load forecasting model and vehicle-to-grid evaluation of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 88-96.
- [18] 周翔,陈杰军,谢培元,等. 基于效用最大化原则的电动汽车充电站负荷特性分析方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 1-8.  
ZHOU Xiang, CHEN Jiejun, XIE Peiyuan, et al. Load demand analyzing method for electric vehicle charging station based on the principle of maximizing utility [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 1-8.
- [19] 任丽娜,李相学. 考虑用户行为的电动汽车充电电价制定策略[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(6): 505-513.  
REN Lina, LI Xiangxue. Price strategy for electric vehicles charging considering users' behavior [J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(6): 505-513.
- [20] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty [J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297-323.
- [21] 徐爱庆,陈欣,朱金福. 基于累积前景理论的机场群旅客出行决策行为分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 14-21.  
XU Aiqing, CHEN Xin, ZHU Jinfu. Passenger travel choice in multiple airport system based on cumulative prospect theory [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(6): 14-21.

- [22] 朱光宇,丁晨. 基于累积前景理论的最优觅食算法求解多目标流水车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统,2022,28(3):690-699.  
ZHU Guangyu,DING Chen. Optimal foraging algorithm based on cumulative prospect theory for multi-objective flow-shop scheduling problems [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2022,28(3):690-699.
- [23] 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.  
MA Yingzi,MA Zhaoxing. Orderly charging optimization and benefit analysis of electric vehicles based on game algorithm [J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(5):10-16.
- [24] 姚一鸣,赵溶生,李春燕,等. 面向电力系统灵活性的电动汽车控制策略[J]. 电工技术学报,2022,37(11):2813-2824.  
YAO Yiming,ZHAO Rongsheng,LI Chunyan,et al. Control strategy of electric vehicles oriented to power system flexibility [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37

(11):2813-2824.

- [25] 王强钢,田雨禾,王健,等. 计及充电站无功补偿的配电网日前-实时协调优化模型[J]. 电力系统自动化,2021,45(17):27-34.  
WANG Qianggang,TIAN Yuhe,WANG Jian,et al. Coordinated day-ahead and real-time optimization model for distribution network considering reactive power compensation of charging station [J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(17):27-34.

#### 作者简介:



冯万璐

冯万璐(1998),女,硕士在读,研究方向为电动汽车充放电策略(E-mail:102010361@hbut.edu.cn);

权轶(1980),男,硕士,讲师,研究方向为电力系统优化调度、电力经济调度;

付波(1973),男,博士,教授,研究方向为智能控制、新型电力系统。

## Decision-making model for charging of operational EVs based on adapted cumulated prospect theory

FENG Wanlu<sup>1</sup>, QUAN Yi<sup>1</sup>, FU Bo<sup>1</sup>, ZHAO Nan<sup>1</sup>, LI Chaoshun<sup>2</sup>, LU Junjun<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To accurately describe operational electric vehicle (EV) drivers' irrational charging decision-making behaviors, a decision-making model for charging of operational EVs based on adapted cumulated prospect theory (ACPT) is established. Firstly, considering factors including arriving time, battery power remaining and psychological safety electricity, the charging demand models according to different mixes of peak and valley electricity tariffs is constructed. Then, a variable heterogeneous reference point model for the risk-preference-based ACTP is proposed with consideration of drivers' differences in psychological perception of arriving time and battery power remaining. Finally, the charging decision is evaluated based on the cumulative prospect values of the operational EV. Simulations are implemented and the results show that under the premise of a psychologically safe power level, owners with weaker psychologically perceived value will charge in advance instead of delaying charging. By combining risk preference and psychologically perceived value, the charging decision-making model proposed by this paper can explain irrational decision-making behaviours of operational EV drivers more accurately.

**Keywords:** heterogeneous reference point; psychological safety electricity; psychologically perceived value; adapted cumulative prospect theory; risk preference factor; irrational decision

(编辑 方晶)