

# 民航电动特种车有序充电策略

高建树<sup>1</sup>, 罗云朝<sup>2</sup>, 马临凯<sup>2</sup>, 邢书剑<sup>3</sup>

(1. 中国民航大学机场学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;  
3. 中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300)

**摘要:**为满足保障航班正常运行对特种车辆的需求和民航电动特种车对能量补充的要求,提出一种有序的充电控制策略。首先,分析实时航班数量与机场特种车需求的关系和实时航班数量对电动特种车充电电量临界阈值的影响;然后,以实时航班数量及电动特种车的充电电量需求量为约束条件,以电动特种车的充电成本为最小目标函数,建立电动特种车的有序充电数学模型;最后,根据某机场的电动特种车的运行数据,在有序和无序充电策略控制下,对特种车的充电行为进行算例仿真。算例仿真表明:提出的有序充电策略在保障航班正常运行的条件下能削减电动特种车的充电行为对供电电网线路负载造成的冲击,同时使电动特种车的充电成本下降。

**关键词:**民航电动特种车;有序充电决策;混合整数规划;数学模型

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.02.015 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2022)02-0129-08

## Orderly charging method of civil aviation specific electric vehicle with the mixed integer programming

GAO Jianshu<sup>1</sup>, LUO Yunchao<sup>2</sup>, MA Linkai<sup>2</sup>, XING Shujian<sup>3</sup>

(1. Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 3. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** To meet the flight guarantees and the charging requirements of Civil Aviation Specific Electric Vehicle (CASEV), a charging control strategy is proposed in this paper. Firstly, the relation between the number of real-time flights and the number of CASEV, and the impacts of the number of real-time flights on the critical threshold of electric special vehicle charging power are analyzed. Then, a orderly mathematical model of CASEV charging strategy, which is subjected to the number of flights and charging capacity of the electric vehicle, is established which takes the minimum cost of charging as the objective function. At last, based on the actual operation data from an existing airport electric special vehicle, the charging behaviors of airport electric vehicles under the ordered charging and out-of-order charging strategies are simulated. It is shown that the proposed orderly charging strategy can decrease the impacts on the power supply grid from the charging for CASEV, and also decrease the cost of charging operations.

**Key words:** civil aviation specific electric vehicle; ordered charging strategy; mixed integer programming; mathematical model

收稿日期:2018-06-27;修回日期:2018-11-20

基金项目:中国民航大学中央高校基本科研业务费专项资金(3122015c012)

通信作者:邢书剑(1984-)男,博士,讲师,主要从事电气自动化等研究;E-mail:xingshujian521@163.com

中国航空运输产业正在快速发展<sup>[1]</sup>,而民航运输产业迅速发展的同时亦兼顾了绿色发展。民航机场的地面特种车电动化速度加快,电动特种车的数量和种类都在快速增长<sup>[2-3]</sup>。地面特种车电动化的发展需要更为完善的充电策略为地面电动特种车的充电运行提供保障。优质的充电策略不仅需要满足特种车的充电需求,还要能削减特种车的充电行为对供电电网线路负载造成的冲击,同时使电动特种车的充电成本下降。

目前,针对常规民用电动车充电的研究较多,而针对机场特种车充电的研究较为有限,同时,在关于常规电动汽车的充电研究中,多采用主动价格激励策略<sup>[3-5]</sup>。

文献[6-9]研究了机场电动特种车充电与调度策略。文献[6]采用 ID3 决策树算法和全反馈神经网络,将机场电动特种车的工作和调度问题归结为旅行商(traveling salesman problem, TSP)规划问题;文献[7]采用决策树算法对机场燃油和电动特种车进行任务分配;文献[8]以最小的充电等候时间、最小运行周期为目标,优化整个机场的电动特征车运行策略;文献[9]考虑车辆行走路线和电池的生命周期成本,提出一种机场特种电动车的运行策略。但文献[6-8]主要研究机场电动特种车的任务分配,并未考虑车辆剩余电量变化对机场电动特种车运行的影响;文献[9]没有考虑车辆需求量变化对电动车使用策略的影响。因此,上述文献缺乏对航班数量与电动特种车需求的适应性。

文献[10]搭建了模拟电动汽车的随机性充电模型,提出民用电动车充电双层控制策略;文献[11]考虑由分时电价引起的居民电网负荷的随机波动,提出了降低电网负荷波动不确定度的分时定价充电策略;文献[12]以充电成本和车辆电量缺少量最小为优化目标,提出了一种有序的充电策略。但文献[10-12]都只考虑一天内充电站只为同一辆车提供一次充电服务,未考虑同一辆车一天可能多次充电的情况。

机场电动特种车作为在民航机场运行的特种设备,其运行特点与一般电动车有较大的不同。民航电动特种车需要完成保障航班正常运行任务,所以其充电行为受航班数量、飞机等待时间、停机时间等

影响<sup>[13]</sup>。民航电动特种车一天之内可能会多次充电,以满足航班保障需求,此外,因机场管制要求,机场车辆的运行路线较为固定。所以,在处理机场电动特种车的充电问题上,文献[6-12]对此方面的研究存在一定的困难。

针对电动特种车的充电过程会受航班对电动特种车需求量的影响,本文通过调整机场特种车充电电量临界值阈值来调整可执行航班保障任特种车的数量,以满足航班保障需求。以电动特种车的充电成本为最小目标函数,建立其有序充电数学模型,提出一种新型有序充电控制策略;以某机场实际充电数据作为仿真算例,分析有序充电策略对负荷冲击及充电成本的影响。

### 1 机场电动特种车有序充电策略

在满足航班数量对机场电动特种车需求的基础上,考虑电动特种车的电量变化和一天可能多次充电的需求,本文设计一种新型的电动特种车有序充电控制策略,如图 1 所示。

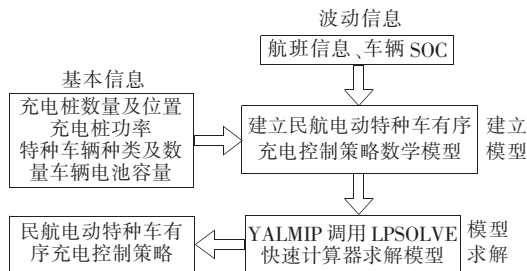


图 1 有序充电策略

Figure 1 Ordered charging strategy

该策略需要输入充电枪和电动特种车的基本信息,然后输入航班数量信息和车辆电量(state of charge, SOC)值等波动信息。本文根据机场特种车的运行规律建立民航电动特种车的有序充电数学模型,结合 YALMIP 工具和 LPSOLVE 求解器对模型优化求解<sup>[14-15]</sup>,获得民航电动特种车的有序充电控制策略。

由于航班需要电动特种车来保障,故第  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) 时间段的航班数量决定了  $j$  时间段内得电动特种车需求数量。引入车辆 SOC 的临界阈值  $S$  来确定车辆是否执行充电行为。当第  $m$  辆车执行充电行为时,记录车辆到达充电到充电枪的时间

和电池 SOC 值,即  $t_{m,\text{in}}$ 、 $S_{m,\text{in}}$ ;而  $t_{m,\text{out}}$ 、 $S_{m,\text{out}}$  分别表示车辆的充电结束时间和此时的电池 SOC 值。在当前时间段,若未充电且车辆 SOC 值大于临界阈值  $S$  的机场电动特种车数量无法满足航班对特种车辆的需求时,则由第  $m$  辆车的 SOC 值来决定是否提前结束充电;若当前未充电且车辆 SOC 值大于临界阈值  $S$  的车辆数量已满足航班保障对特种车辆的数量需求时,则第  $m$  辆车继续充电,使车辆 SOC 值尽可能达到 80% 以上。

## 2 输入信息

民航机场电动特种车有序充电模型的优化求解需要先输入机场充电枪数量  $N$ 、充电机功率  $Q$ 、机场电动特种车辆数量  $M$ 、电池容量  $B$  以及航班数量矩阵  $L^{\text{plane}}$ 、车辆 SOC 值等信息。

常规机型与其正常运行所需特种车种类和数量对应关系如表 1 所示<sup>[16-17]</sup>。

表 1 典型机型与特种车需求对照

Table 1 Comparison between typical airplane and special vehicles

机型	最大乘客 人数/人	货舱容 积/m <sup>3</sup>	登机门/ 个	货仓门/ 个	摆渡车/ 车次	行李传送 带车/辆	客梯车(若 需要)/辆
A318-122	136	21.21	2	2	3	2	2
A319-111	145	27.64	2	2	3	2	2
A320-111	180	37.41	2	2	4	2	2
A321-111	220	51.73	3	2	5	2	3
A330-201	375	136.00	3	2	3	2	3
A330-301	375	162.80	3	2	8	2	3
A380-841	853	184.00	5	2	17	2	5
B737-600	149	20.40	2	2	3	2	2
B747-400	524	170.00	4	2	11	2	4
B767-300	350	118.40	3	2	7	2	3
B777-200	440	162.00	3	2	9	2	3
B787-8	381	124.60	2	2	8	2	2
MD-82	152	33.50	2	2	3	2	2

结合表 1 和机场航班的机型和数量信息即可确定此时间段内需要执行保障任务和可进行充电的特种车种类和数量。

## 3 数学模型的建立与求解

### 3.1 电动特种车充电数学模型的建立

各类机场特种车辆 7~15 min 完成一次保障任务,因此,时间段划分长度取 10 min 较为合理,将 1 d 划分为 144 个时间段,即  $T=10$  min、 $J=144$ 。

1) 定义第  $m$  辆电动汽车开始充电时间段为

$$T_{m,\text{in}} = \left\lfloor \frac{\text{trans}(t_{m,\text{in}})}{T} \right\rfloor + 1 \quad (1)$$

2) 定义第  $m$  辆电动汽车停止充电时间段为

$$T_{m,\text{out}} = \left\lfloor \frac{\text{trans}(t_{m,\text{out}})}{T} \right\rfloor \quad (2)$$

其中,  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示整数化计算,即  $\lfloor a \rfloor$  是整数且满足  $\lfloor a \rfloor \geq a$ ,  $\text{trans}(t)$  表示时间变换成分钟数。如:第  $m$  辆车从 14:15 开始至 17:21 结束充电。充电开始时间 14:15 转化分钟数为 855 min,  $855/10=85.5$ , 取整为 86, 即  $T_{m,\text{in}}=86$ ; 同样地, 充电结束时间最终转化为时间段为  $T_{m,\text{out}}=104$ , 即充电时间段为第 86 到第 104 时间段。

3) 定义一个三维矩阵  $p$ , 其中矩阵  $p$  的元素为 0 或 1, 矩阵大小为  $N \times M \times J$ 。当第  $j$  个时间第  $m$  辆电动特种车在第  $n$  个充电枪上充电时,  $p(n, m, j)=1$ , 否则  $p(n, m, j)=0$ 。

4)  $L^{\text{plane}}$  为航班数量矩阵,  $L^{\text{plane}}(j)$  表示在第  $j$  时间段有  $L^{\text{plane}}(j)$  个航班需要特种车辆保障。

5) 机场共有  $N$  个充电枪, 且第  $n$  个 ( $n=1, 2, \dots, N$ ) 充电枪功率为  $Q_n$ , 若所有充电枪功率均

为  $Q$ , 则  $Q_n = Q$ 。

6) 机场有  $M$  辆民航电动特种车, 第  $m$  ( $m=1, 2, \dots, M$ ) 辆车的电池容量为  $B_m$ 、电池 SOC 值为  $S_m$ 。

7) 第  $m$  辆车的电池电量缺少量为  $D_m^{\text{short}}$ , 且  $D_m^{\text{short}} = B_m(1 - S_m)$ 。

8) 依据分时电价对充电行为进行调节<sup>[18-19]</sup>。定义一维矩阵为  $C^p$ ,  $C^p(j)$  表示第  $j$  时间段的电网电价。

充电枪的约束条件如下:

$$\sum_{m=1}^M P(n, m, j) \leq 1, \forall j, n \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N P(n, m, j) \leq 1, \forall j, m \quad (4)$$

式(3)、(4)表示在任意一个时间段内一台电动特种车只能在一个充电枪上充电, 不存在同辆车同时在不同的充电枪充电情况。

充电量约束如下:

$$B_m(S_{m, \text{out}} - S_{m, \text{in}}) \leq \sum_{n=1}^N \sum_{j=T_{m, \text{in}}}^{T_{m, \text{out}}} Q_n \frac{T}{60} P(n, m, j) \quad (5)$$

$$0 \leq D_m^{\text{short}} \leq B_m, \forall m \quad (6)$$

其中, 式(5)表示任意一台特种车的充电量不超过为其所充电的充电枪的耗电量; 式(6)表示任意一台特种车的缺电量需大于零, 且不超过其电池容量。

线路负载约束如下:

$$Q \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N P(n, m, j) \leq S(j), \forall j \quad (7)$$

式中  $S(j)$  为  $j$  时间段充电线路能经受的最大安全负载功率。式(7)表示任意时间段的所有正在充电的充电枪的功率总和不超过充电电网能经受的最大安全负载。

$j$  时间段的充电成本为

$$C(j) = C^p(j) Q \frac{T}{60} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N P(n, m, j), \forall j \quad (8)$$

民航机场电动特种车的充电模型目标函数为

$$\min \sum_{j=1}^J C(j) \quad (9)$$

通过式(1)~(9)的处理, 建立基于混合整数规划的民航机场电动特种车的有序充电策略数学模型。

### 3.2 电动特种车充电数学模型的求解

本文利用 LPSOLVE 求解器对混合整数规划模型的快速求解能力, 采用 YALMIP 建模并调用 LPSOLVE 求解器进行求解。民航机场电动特种车有序充电数学模型求解流程如图 2 所示。

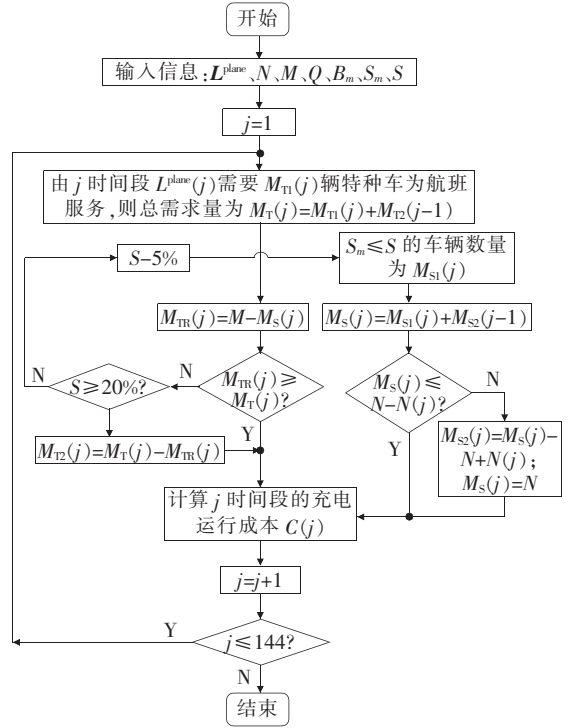


图 2 计算流程

Figure 2 Calculation flow chart

1) 定义  $M_{T1}(j)$  为  $j$  时间段航班  $L^{\text{plane}}(j)$  需要的特种车数量;  $M_{T2}(j)$  为  $j$  时间段正常保障所缺少的车辆数量;  $M_T(j)$  为  $j$  时间段特种车总需求数量;  $M_{TR}(j)$  为  $j$  时间段非充电状态且电池 SOC 值大于临界阈值  $S$  的电动特种车数量, 即可提电量充足可以正常作业的特种车数量。

2) 定义  $M_{S1}(j)$  为  $j$  时段特种车的电池 SOC 值低于临界阈值  $S$  的车辆数量;  $N(j)$  为  $j$  时段为特种车充电的充电枪数量;  $M_{S2}(j)$  为  $j$  时间段需充电而无可充电的充电枪特种车数量;  $M_S(j)$  为  $j$  时段需要充电的特种车数量。

为增强决策的合理性, 当航班数量  $L^{\text{plane}}(j)$  所需要的特种车数量大于  $M_{TR}(j)$  时, 引入相应的惩罚系数  $E_j^p$ 。  $C_E$  为引入惩罚系数而增加的充电成本, 即

$$C_E = \sum_{j=1}^J E_j^p \cdot M_{S2}(j) \quad (10)$$

民航机场电动特种车有序充电模型的目标函数最终修正为

$$\min C = \min_{P_{N \times M \times J}} \left( \sum_{j=1}^J C(j) + C_E \right) \quad (11)$$

图 2 中基础参数包含机场可用充电枪数量  $N$ 、充电枪功率  $Q$ 、机场电动特种车辆数  $M$ 、车辆电池容量  $B_m$  以及航班数量矩阵  $L^{\text{plane}}$ 、车辆 SOC 值  $S_m$  等信息。当  $S = 35\%$  时,表示车辆 SOC 值小于  $35\%$  的车不再提供保障服务,车辆需要进行充电。此外,由于民航机场特种车辆的电池过度放电会导致其安全性降低、性能和寿命受损,故当临界阈值  $S < 20\%$  时, $S$  即不能再降低,以保证电池电量过低的特种车辆不会被派出执行任务。

在  $j$  时间段内,车辆按照 SOC 值的大小进行优先等级排序,SOC 值越低的优先等级越高,优先等级最高为 1、最低为  $M$ 。优先等级高则优先进行充电,车辆遍历所有充电桩的  $N$  个充电枪,选择距离车辆位置最近的充电桩上的充电枪进行充电,若充电枪已经在为车辆充电,则选择次近位置充电桩上的充电枪充电。

### 3.3 电动特种车充电数学模型说明

1) 异常情况处理。

①  $j$  时间段可能会出现  $M_{\text{TR}}(j) < M_T(j)$  的情况,即特种车的需求数量超过能正常作业的特种车数量。当  $M_{\text{TR}}(j) < M_T(j)$  时,将临界阈值  $S$  调低  $5\%$  ( $S - 5\%$ ) 直到  $M_{\text{TR}}(j) \geq M_T(j)$ 。若阈值  $S$  调低到小于  $20\%$ ,而  $M_{\text{TR}}(j)$  仍小于  $M_T(j)$  时,则将此时间段的特种车需求缺少的数量 ( $M_T(j) - M_{\text{TR}}(j)$ ) 累计到  $j + 1$  时段的车辆需求数量  $M_T(j + 1)$  中。

②  $j$  时间段已有  $N(j)$  个充电枪被充电占用,可能出现  $M_{\text{S1}}(j) > N - N(j)$  的情况,即充电枪数量小于需充电车辆数量。当  $M_{\text{S1}}(j) > N - N(j)$  时,将  $j$  时间有充电需要但实际并未充电的车辆数量  $M_{\text{S2}}(j)$  累计到  $j + 1$  时间段的  $M_{\text{S2}}(j + 1)$  中。

2) 航班数量惩罚函数  $E_j^p$ 。

$E_j^p$  由  $j$  时间段中需要特种车保障的航班数量决定,方法为

$$E_j^p = \frac{J \cdot M_{\text{T1}}(j)}{\sum_{j=1}^J L^{\text{plane}}(j)} \cdot \lambda(j) \quad (12)$$

式中  $\lambda(j)$  为  $j$  时段的航班数量惩罚系数,由航空、

地勤服务、机场保障、特种车辆等专家共同确定。

## 4 算例模拟仿真与分析

在民航机场运行的特种车中,飞机牵引车、机场摆渡车以及行李装载车、客梯车、行李牵引车等均是适合电动化的平台<sup>[20-21]</sup>。本文整理了中国 120 余家机场和运行单位使用的机场地面特种车信息,其中,保有量排行前 5 位的车辆种类、数量与占比分布如表 2 所示。

表 2 机场特种车分布

Table 2 Airport special vehicle distribution %

特种车种类	占比	
	机场	驻场单位
行李牵引车	20.94	19.50
行李传送带车	9.16	13.15
客梯车	8.86	8.05
飞机牵引车	7.89	7.49
摆渡车	6.08	4.70

其中,电动行李传送带车占比较高且电动化试点运行的较早。产品成熟、安全性高和经济性好的铅酸电池是机场地面电动车的主要蓄能设备<sup>[21-22]</sup>。因此,本文以使用铅酸电池的电动化行李传送带车运行为优化算例。文献[22]中铅酸电池多段恒流和脉冲充电方式的特点是充电功率变化缓慢、变化幅度小,该文假设特种车的充电功率恒定。

### 4.1 参数设置

算例数据的来源为某机场运行的电动行李传送带车 1 a 内的充电数据。

1) 基本参数设置。

仿真算例中设置:  $N = 20$  (充电枪),  $M = 50$  (电动特种车),  $Q = 6 \text{ kW}$  (充电功率),  $B_m = 32 \text{ kW} \cdot \text{h}$  (每台电动特种车电池容量),  $T = 10 \text{ min}$ 、 $J = 144$ 、 $\lambda(j) = 1.3$ 。

2) 充电枪设置。

文献[23-25]定义了中国 50 Hz 电网的电动车交/直流充电桩(站)参数,如表 3 所示。该算例的充电桩(站)的充电枪配置:交流 220 V,额定电流不超过 32 A,以恒功率 6 kW 进行充电。

表3 各充电模式的电压、电流、功率

Table 3 Voltage, current, power of each charging mode

充电模式	充电电压/V	额定电流/ A	额定功率/ kW
交流 A(AC LA)	220(AC, 1-phase)	≤16	≤3.5
交流 B1(AC LB1)	220(AC, 1-phase)	≤32	≤7
交流 B2(AC LB2)	380(AC, 3-phase)	≤32	≤21
交流 C(AC LC)	380(AC, 3-phase)	≤250	≤165
直流 A(DC LA)	200~500(DC)	80~100	16~50
直流 B(DC LB)	350~700(DC)	125~160	43.7~112
直流 C(DC LC)	500~950(DC)	200~250	100~237.5

## 3) 航班数量假设。

本算例由某机场的一年间的航班运行保障数据处理后得到,需要保障的航班数量为

$$L^{\text{plane}} = [9, 7, 9, 7, 5, 5, 4, 4, 6, 4, 4, 4, 5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 7, 11, 19, 17, 17, 15, 17, 23, 21, 22, 19, 22, 23, 17, 13, 11, 15, 19, 23, 22, 20, 18, 17, 17, 14, 11, 15, 14, 20, 15, 16, 13, 12, 14, 14, 17, 13, 13, 12, 13, 14, 14, 13, 12, 12, 11, 13, 13, 16, 14, 13, 14, 15, 14, 14, 13, 16, 13, 13, 13, 10, 10, 12, 8, 9, 10, 9, 7, 5, 7, 9, 6, 5, 5, 6, 8, 11, 9, 6, 9, 11, 9, 10, 8, 9, 13, 12, 11, 8, 12, 11, 11, 11, 8, 12, 11, 16, 16, 15, 12, 11, 14, 10, 8, 8, 9, 10, 8]$$

## 4) 车辆 SOC 值设置。

为驱动该模型滚动优化,该算例设开始进行充电的民航机场电动特种车辆 SOC 值服从概率为  $(0.3 \times N(0.4, 0.12) + 0.4 \times N(0.8, 0.12))$  的随机分布<sup>[6]</sup>。其中,  $N(\mu, \sigma^2)$  表示期望为  $\mu$ 、方差为  $\sigma^2$  的正态分布。

## 5) 分时电价。

民航机场电动特种车充电所消耗电能的购买价格<sup>[12]</sup>如表4所示。

表4 分时电价

Table 4 Time-of-use price list

时段	$C^p(j)$ /(元/(kW·h))
峰时段(08:00—12:00, 17:00—21:00)	0.869
平时段(12:00—17:00, 21:00—00:00)	0.687
谷时段(00:00—08:00)	0.365

## 4.2 结果说明与分析

本算例模型的计算是使用 Matlab 2016a 软件在 3.30 GHz 的 Inter(R) Xeon(R) CPU E3-1225 v5 计算机上完成。

1) 本算例的有序充电策略结果曲线如图3所示,其中,常规负荷是机场充电线路的实际负载与其最大负载容量的比值<sup>[26]</sup>。无序充电曲线是无干预下的处于充电状态民航机场电动特种车辆的占比曲线;有序充电曲线则是该文的有序充电策略控制下的处于充电状态民航机场电动特种车辆的占比曲线。

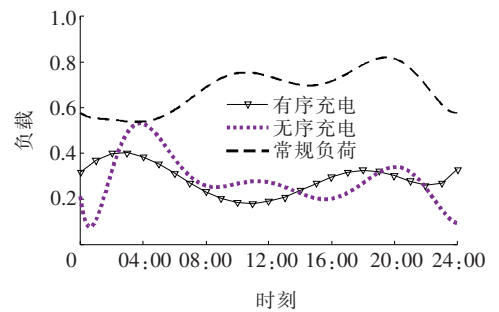


图3 有序、无序2种负荷曲线

Figure 3 Orderly and disordered

由图3可知,无序充电、有序策略充电曲线的峰值分别为0.562、0.400,谷值分别为0.063、0.205,峰、谷差值分别为0.499、0.195。相比之下,本文提出的有序充电策略在电网线路负载的高峰时间段减少了充电车辆。此外,峰、谷差值下降了60.91%,特种车充电比例波动减小;特种车的峰值充电占比下降0.162,可防止车辆集中充电行为对电网线路负载的冲击。体现了本文提出的有序充电策略的优势。

2) 本算例中机场电动特种车的充电成本如表5所示,可知民航机场电动特种车在无干预的无序充电下充电成本较高,而本文提出的有序充电策略可以有效降低机场电动特种车的充电运行成本,充电成本减少了35.53元,即降低了12.31%。

表5 充电运行成本

Table 5 Charging results

充电控制方法	充电成本/元
无序充电	288.603
有序充电	253.073

## 5 结语

本文考虑实时航班数量对电动特种车充电电量临界值的影响,提出了有序的民航机场电动特种车充电策略。以在某民航机场运行了 1 a 的电动特种车的充电运行数据为基础,对比有序和无序充电策略,得出以下结论:

1) 提出了一种适用于民航机场运行的电动特种车充电的混合整数规划决策的数学模型;

2) 提出了一种新型的有序充电策略,此策略能满足民航电动特种车一天之内可能多次充电需求以及航班保障需求;

3) 有序充电策略可以减小民航机场电动特种车充电对电网线路负载的冲击,并能节省特种车充电成本。

### 参考文献:

[1] 于剑,郭亦彤. 民航运输与区域发展的互动机理研究[J]. 学术交流,2021(4):123-136.

YU Jian, GUO Yitong. Research on the interaction mechanism of civil aviation transportation and regional development[J]. Academic Exchange, 2021(4): 123-136.

[2] 杨铁军,彭震. 民用机场新能源电动车辆火灾防范策略[J]. 民航管理,2021(3):80-82.

YANG Tiejun, PENG Zhen. Fire prevention strategies for EVs at civil airports[J]. Civil Aviation Management, 2021(3): 80-82.

[3] 蒋怡静,于艾清,黄敏丽. 考虑用户满意度的电动汽车时空双尺度有序充电引导策略[J]. 中国电力,2020,53(4):122-130.

JIANG Yijing, YU Aiqing, HUANG Mingli. Coordinated charging guiding strategy for electric vehicles in temporalspatial dimension considering user satisfaction degree[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 122-130.

[4] 杨祺铭,季陈林,刘友波,等. 多条公交线路的光储充电站日内滚动优化策略[J]. 智慧电力,2020,48(8):44-50+90.

YANG Qiming, JI Chenlin, LIU Youbo. Day-rolling optimization strategy for photovoltaic-energy storage charging station with multiple electric bus lines[J]. Smart

Power, 2020, 48(8): 44-50+90.

[5] 李磊,赵新,李晓辉,等. 基于动态交通信息的电动汽车充电需求预测模型及其对配网的影响分析[J]. 电网与清洁能源,2020,36(3):107-118.

LI Lei, ZHAO Xin, LI Xiaohui. Electric vehicle charging demand prediction model based on dynamic traffic information and its impacts on distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 107-118.

[6] 尚德轩. 机坪电动特种车辆运行优化调度方法研究[D]. 天津:中国民航大学,2017.

[7] 费春国,尚德轩. 基于决策树机场电动及燃油特种车辆任务分配[J]. 中国民航大学学报,2017,35(4):46-50.

FEI Chunguo, SHANG Dexuan. Task assignment of electric and fuel special vehicles based on decision tree[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2017, 35(4): 46-50.

[8] PADRÓN S, GUIMARANS D, RAMOS J J, et al. A bi-objective approach for scheduling ground-handling vehicles in airports[J]. Computers and Operations Research, 2016, 71: 34-53.

[9] BARCO J, GUERRA A, MUÑOZ L, et al. Optimal routing and scheduling of charge for electric vehicles: a case study[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-16.

[10] 何西,涂春鸣,王丽丽,等. 考虑用户行车习惯的电动汽车充电双层控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):64-69.

HE Xi, TU Chunming, WANG Lili, et al. Double-layer charging strategy for electric vehicles considering users' driving patterns[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 64-69.

[11] 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.

[12] 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):70-101.

WANG Xiaokun, ZHAI Qiaozhu, BAI Jie. Ordered charging method of electric vehicles based on mixed in-

- teger programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9):70-101.
- [13] 吴枕. 大型机场地面保障车辆协同与动态调度研究[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
- [14] LÖFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB [C]//IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, Taipei, China, 2004.
- [15] LI W, GUERRERO-GARCÍA P, SANTOS-PALOMO A. A basis-deficiency-allowing primal phase-I algorithm using the most-obtuse-angle column rule[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2006, 51(6/7):903-914.
- [16] 民用航空器选型指南编委会. 民用航空器选型指南[M]. 北京:中国民航出版社, 2014:36-140.
- [17] 乐卫松. 大型客机设计[M]. 上海:同济大学出版社, 2014:114-146.
- [18] 王海伟, 徐晓, 陈中. 数据驱动的大型居民区电动汽车动态充电可行性分析[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3):89-96.  
WANG Haiwei, XU Xiao, CHEN Zhong. Feasibility analysis of data-driven dynamic charging of electric vehicles in large residential areas[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3):89-96.
- [19] 赵玉, 徐天奇, 李琰等. 基于分时电价的电动汽车调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11):92-101.  
ZHAO Yu, XU Tianqi, LI Yan. Research on electric vehicle scheduling strategy based on time-shared electricity price[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11):92-101.
- [20] 郝珍珍. 机场地面车辆“油改电”试点经验分析[J]. 综合运输, 2017, 39(10):59-61.  
HAO Zhenzhen. Civil aviation airport vehicles “oil to electricity” pilot experience and prospect[J]. China Transportation Review, 2017, 39(10):59-61.
- [21] 殷龙, 衡红军. 基于最邻近算法的机场特种车辆调度应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(7):151-155.  
YIN Long, HENG Hongjun. Research on application of airport special vehicles scheduling based on nearest neighbor algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(7):151-155.
- [22] 高挺. 电动汽车充/换电站规划和有序充电策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- [23] ARINDAM M, KOOK K S, GIUMENTO A, et al. Evaluation of PEV loading characteristics on hydro-quebec's distribution system operation[C]//24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS24), Stavanger, Norway, 2009.
- [24] GB/T 18487.1—2015. 电动汽车传导充电系统——第一部分 通用要求[S].
- [25] GB/T 18487.3—2001. 电动汽车传导充电系统——电动车辆交流/直流充电机(站)[S].
- [26] 姚建刚, 付强, 叶伦, 等. 考虑峰谷分时电价影响的变电站容量规划方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13):53-61.  
YAO Jiangang, FU Qiang, YE Lun, et al. Substation capacity planning method considering influence of peak-valley time-of-use power price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13):53-61.