

计及行车计划编制的电动公交车有序充电策略

蔡子龙, 束洪春, 杨 博, 单节杉

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:为了提高电动公交车的经济性并兼顾公交车和电网的利益,需综合考虑电动公交车的充电策略和行车计划编制问题。首先,生成满足时间接续关系和电池电量约束的可行车次链,建立以充电成本最低为优化目标的可行车次链有序充电阶段1模型和以总运营成本最低为优化目标的最优车次链选择模型;然后,分别以白天和夜间充电负荷波动最小为优化目标,建立最优车次链有序充电阶段2模型和夜间充电二次规划模型;最后,以一条公交车线路为例对所提模型进行验证,结果表明所提模型和方法能满足公交车公司制定行车计划的需求,实现了电动公交车总运营成本最低的目标,同时通过有序充电达到了减少充电成本和平抑充电负荷波动的目的,对指导电动公交车制定充电策略和行车计划具有重要的参考价值。

关键词:电动公交车;行车计划;充电策略;有序充电;分时电价;车次链

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202106022

0 引言

大力发展电动汽车(EV)对减少石油消耗和降低污染物的排放量具有重要的意义。电动公交车具有污染物排放量小、节能减排效果好等优点,是当前推广使用的重点方向。与普通燃油公交车相比,电动公交车配置的动力电池的能量密度远低于汽油,要提高电动公交车的运营经济性,需要综合考虑其充电策略和行车计划编制问题。这2个问题的求解均与电动公交车配置的动力电池容量、充电桩功率、充电时长、百千米耗电量、线路长度等密切相关,对此进行研究具有重要的工程应用价值。

当前有关电动公交车运营的研究主要从电网和交通2个视角进行。电网视角的研究对象包括但不限于电动公交车,目前已取得较多的研究成果:文献[1-2]提出了EV充电负荷预测模型;文献[3]在配电网规划中考虑了分布式电源时序特性及EV时空特性的影响;文献[4]研究了电动公交车参与车网互动(V2G)的优化调度策略;文献[5-6]研究了EV充电站的规划方法;文献[7]建立了一种EV辅助调频与传统机组二次调频的联合优化模型。也有部分学者对电动公交车的有序充电策略进行了研究:文献[8]以电动公交车的充电成本最小为目标,以变压器负荷不过载、充电过程连续、满足充电需求为约束,建立了电动公交车快速有序和无序充电模型;文献[9]研究了快换式电动公交车的经济运行优化策略,根

据换电需求建立了描述换电需求和充电产量的函数,提出了分时电价高峰时段充电控制方法;文献[10]提出了电动公交车的换电规则,建立了车辆-电池组匹配策略,提出了一种电动公交车换电站的充电优化策略,既能降低换电站的充电费用,也能平抑负荷波动和处理电动公交车运行的不确定性问题。上述研究主要从电网的角度出发,优化目标为削峰填谷、维持电网电压稳定^[11]、改善电能质量、减少充电成本,在制定充电策略时较少考虑电动公交车的行车计划编制问题,所建模型的可操作性还有待加强。

交通视角的研究主要针对行车时刻表优化和行车计划编制问题:文献[12]提出了一种纯电动公交车运营时刻表和车辆排班计划的整体优化方法;文献[13]建立了考虑充电约束的电动公交车区域行车计划编制模型,采用遗传算法和贪婪算法对模型进行求解,仿真结果表明所建模型能降低总充电费用;文献[14]考虑到电动公交车错过正常接续发车班次的情况,建立了单线路纯电动公交车的柔性调度优化模型,并采用遗传算法进行求解,仿真结果表明所建模型能减少车辆的使用数量,提高电动公交车的经济性。但上述研究在设置电动公交车的充电成本时均将充电电价设为固定值,并没有考虑电网的分时电价机制,所得充电成本还有进一步的优化空间。

综上所述,目前综合考虑EV行车计划编制和充电策略制定2个问题的研究尚不多。基于此,本文在制定电动公交车的充电策略时考虑行车计划编制问题,对两问题进行综合研究。首先,生成满足时间接续关系和电量约束的所有可行车次链;然后,以白天充电成本最低为优化目标,以满足充电需求等为约束条件,建立可行车次链有序充电优化模型(阶段1模型),求解得到每条车次链的最优充电成本,并据此求解每条可行车次链的总运营成本;以总运营

收稿日期:2020-11-09;修回日期:2021-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977102,61963020);
云南省重大科技专项计划项目(202002AF080001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977102,61963020) and the Major Science and Technology Special Plan of Yunnan Province(202002AF080001)

成本最低为优化目标,以覆盖全部车次任务、满足车辆数要求为约束条件,建立最优车次链选择模型,求解得到覆盖全部车次任务且总运营成本最低的最优车次链集;在满足阶段1模型约束条件的基础上,以白天充电负荷波动最小为优化目标,以充电成本不大于阶段1的充电成本等为约束条件,建立最优车次链有序充电二次规划模型(阶段2模型);最后,以夜间充电负荷波动最小为优化目标,以夜间充电过程连续为约束条件,建立最优车次链夜间充电优化二次规划模型。以一条电动公交车线路的行车计划、充电策略编制为例对所提模型进行验证。

1 问题提出及解决方法

公交车行车计划编制问题的求解算法主要包括生成-选择法、列生成算法^[15-16]、智能优化算法^[17]。列生成算法能减少生成车次链的规模,但其求解质量取决于生成新列的方法。智能优化算法包括遗传算法、蚁群算法、禁忌搜索算法等,其优点是求解速度快,但求解质量难以保证。本文的研究目标是一个车次链为中等规模的单线路电动公交车的行车计划和充电策略编制问题,考虑到车次链的规模,拟采用生成-选择法来获得最优车次链。其中,生成阶段的主要工作是枚举所有可行的车次链。可行车次链的生成主要考虑以下2点:①满足时间接续关系,即后一车次的发车时间要晚于前一车次的到达时间;②满足电池电量需求,即电动公交车在所有进站到出站时段内均进行充电的情况下能完成车次链的所有车次任务。选择阶段的主要工作是从可行车次链中选择总运营成本最低且覆盖全部车次任务的车次链集合。

目前,电动公交车主要有交流慢充、换电、交(直)流快充3种充电模式。交流慢充的充电功率小,能量补给时间长,一般需按1 d的运营里程配置动力电池容量,存在电池成本过高的问题。换电模式的优点是换电标准容易统一,同时通过合理安排电池组的充电计划能降低充电成本,平抑负荷波动;缺点是需要配备备用电池组,建设和运营成本较高。交(直)流快充能快速补给能量,且得到了国家政策的积极扶持^[18]。由于在前述生成可行车次链时并未对充电策略进行优化,其充电成本还存在优化空间。基于此,本文提出了一种利用电动公交车执行车次链时的进站、出站间隙进行快速补给能量的充电方式,一方面通过快充减少配置的动力电池容量,提高运营经济性;另一方面在分时电价机制下,通过阶段1模型求解各可行车次链的最优充电成本,据此求得各可行车次链的最优运营成本。然后,通过最优车次链选择模型从可行车次链中选择总运营成本最低的可行车次链集合。最后,分别通过阶段2模型和夜间充电二次规划模型求解负荷波动最小的最优

车次链在白天和夜间的充电策略。通过上述模型和方法解决了电动公交车的行车计划、充电策略编制问题,满足了电网和交通两利益主体的需求。

2 数学模型

本文在建立数学模型时对模型的使用场景和条件进行如下设定:①电动公交车以1 d为周期制定调度方案;②不考虑电池容量衰减,电动公交车动力电池的荷电状态(SOC)与其行驶里程成反比;③电动公交车能根据车次链充电计划自动进行充断电工作,无需人工干预,每次进站、出站期间至多进行一次连续充电;④将1 d分为 T 个时段,以每个时段时长 Δt 为最小的调度时间单位。

2.1 阶段1模型

2.1.1 目标函数

对于可行车次链 p ,设其在1 d内的完整进站、出站次数为 L_p 次,第 $l(1 \leq l \leq L_p)$ 次进站、出站的时段分别为 s_l^p, e_l^p ,为了保证充电过程连续,首先枚举第 l 次进站、出站期间所有可能的连续充电时间片段,记为 ϕ_l^p 个。车次链 p 在白天的充电成本 C_d^p 和单位时段内充电桩的充电电量 $E_{\Delta t}$ 分别为:

$$C_d^p = \sum_{l=1}^{L_p} \sum_{j=1}^{\phi_l^p} \sum_{t=b_{l,j}^p}^{b_{l,j}^p + d_{l,j}^p} E_{\Delta t} f_t \delta_{l,j}^p \quad (1)$$

$$E_{\Delta t} = P\eta\Delta t/60 \quad (2)$$

其中, P, η 分别为充电桩的充电功率、充电效率; $b_{l,j}^p$ 和 $d_{l,j}^p$ 分别为车次链 p 第 l 次进站、出站期间第 j 个可充电时间片段的充电开始时段和充电持续时段数; f_t 为时段 t 的分时电价; $\delta_{l,j}^p$ 为0-1型决策变量,表示车次链 p 第 l 次进站、出站期间第 j 个可充电时间片段是否在最终解中,若是则取值为1,否则取值为0。

车次链 p 在白天的充电电量 E_d^p 可表示为:

$$E_d^p = \sum_{l=1}^{L_p} \sum_{j=1}^{\phi_l^p} \sum_{t=b_{l,j}^p}^{b_{l,j}^p + d_{l,j}^p} E_{\Delta t} \delta_{l,j}^p \quad (3)$$

设动力电池的标准容量为 E_{std} ,则车次链 p 在夜间的充电需求量 E_n^p 为:

$$E_n^p = E_{std} - E_d^p \quad (4)$$

设夜间谷时段电价为 f_N ,则夜间充电成本 C_n^p 为:

$$C_n^p = f_N E_n^p \quad (5)$$

以动力电池的总充电成本 C_h^p 最低为优化目标,则目标函数可表示为:

$$\min C_h^p = C_d^p + C_n^p \quad (6)$$

2.1.2 约束条件

(1) 充电需求量约束。

$$\sum_{k=1}^l E_k^p \geq d_l^p \quad l=1, 2, \dots, L_p \quad (7)$$

$$E_k^p = \sum_{j=1}^{\phi_k^p} \sum_{t=b_{k,j}^p}^{b_{k,j}^p + d_{k,j}^p} E_{\Delta t} \delta_{k,j}^p \quad (8)$$

其中, E_k^p 为车次链 p 第 k 次进站、出站期间在充电站的充电量; d_l^p 为车次链 p 前 l 次进站、出站期间的总充电需求量。

(2) 最大可充电电量约束。

车次链 p 前 l 次进站、出站期间最大可充电电量 $E_{m,l}^p$ 可表示为:

$$E_{m,l}^p = \sum_{k=1}^l E_{h,k}^p \quad l=1, 2, \dots, L_p \quad (9)$$

其中, $E_{h,k}^p$ 为车次链 p 执行车次任务 k 时的耗电量。

车次链 p 前 l 次进站、出站期间的总充电电量受动力电池容量限制, 不能超过最大可充电电量, 即:

$$\sum_{k=1}^l E_k^p \leq E_{m,l}^p \quad l=1, 2, \dots, L_p \quad (10)$$

(3) 最大能充电电量约束。

电动公交车在每次进站、出站期间的能充电电量取决于该进站、出站期间折合的可充电时段数。车次链 p 前 l 次进站、出站期间最大能充电电量 $E_{q,l}^p$ 为:

$$E_{q,l}^p = \sum_{k=1}^l E_{\Delta} T_k^p \quad l=1, 2, \dots, L_p \quad (11)$$

$$T_k^p = e_k^p - s_k^p - 2 \quad (12)$$

其中, T_k^p 为电动公交车第 k 次进站、出站期间的可充电时段数(设进站、出站各占1个时段)。则最大能充电电量约束可表示为:

$$\sum_{k=1}^l E_k^p \leq E_{q,l}^p \quad l=1, 2, \dots, L_p \quad (13)$$

(4) 充电电量约束。

设执行车次链 p 的电动公交车第 l 次进站时动力电池的电量为 $E_{x,l}^p$, 可表示为:

$$E_{x,l}^p = \begin{cases} E_{\text{std}} - E_{h,l}^p & l=1 \\ E_{\text{std}} + \sum_{k=1}^{l-1} E_k^p - \sum_{k=1}^l E_{h,k}^p & l=2, 3, \dots, L_p \end{cases} \quad (14)$$

电动公交车进站时动力电池的电量与进站后的充电电量之和不能大于动力电池的最高容量限值; 且电动公交车进站时动力电池的电量与进站后的充电电量之和减去下一车次任务的耗电量不能小于动力电池的最低容量限值。即满足如下约束:

$$\begin{cases} E_{x,l}^p + E_l^p \leq E_{\text{max}} \\ E_{x,l}^p + E_l^p - E_{h,l+1}^p \geq E_{\text{min}} \end{cases} \quad l=1, 2, \dots, L_p \quad (15)$$

其中, E_{max} 、 E_{min} 分别为避免动力电池过充、过放导致电池损坏而规定的最高、最低容量限值。

2.2 最优车次链选择模型

基于2.1节计算所得每条可行车次链的最优充电成本, 可确定每条可行车次链的总运营成本。本节将从可行车次链中选择覆盖全部车次任务且总运营成本最低的车次链集合。

2.2.1 目标函数

设 Ω 为可行车次链集合, M 为要执行的车次任

务数量, $p(p \in \Omega)$ 为车次链, 以车次链总运营成本最低为优化目标, 目标函数如式(16)所示^[16]。

$$\min \sum_{p \in \Omega} C_p \psi_p \quad (16)$$

$$C_p = C_g^p + C_b^p \quad (17)$$

$$C_b^p = C_z^p + C_w^p + C_h^p \quad (18)$$

$$C_z^p = c_z T_z^p \quad (19)$$

$$C_w^p = c_w T_w^p \quad (20)$$

其中, ψ_p 为0-1型决策变量, 表示最终解是否包含车次链 p , 若包含则取值为1, 否则取值为0; C_p 为车次链 p 的总运营成本; C_g^p 为车次链 p 的固定成本, 包含电动公交车、动力电池的购置成本; C_b^p 为车次链 p 的可变成本, 包括载客运行成本 C_z^p 、车场等待成本 C_w^p 、动力电池的总充电成本 C_h^p ; c_z 为单位时段载客运行成本; T_z^p 为车次链 p 的载客运行时段数; c_w 为单位时段等待发车成本; T_w^p 为车次链 p 的等待发车时段数。

2.2.2 约束条件

(1) 车次任务约束。

每一个车次任务均需被执行且仅被执行一次, 即:

$$\sum_{p \in \Omega} \theta_i^p \psi_p = 1 \quad i=1, 2, \dots, M \quad (21)$$

其中, θ_i^p 为0-1型变量, 表示车次链 p 是否包含车次任务 i , 若包含则取值为1, 否则取值为0。

(2) 电动公交车数量约束。

一个车次链仅由一辆电动公交车执行, 设该线路可调度的电动公交车数量为 N , 则车场内电动公交车数量需满足如下约束:

$$\sum_{p \in \Omega} \psi_p \leq N \quad (22)$$

2.3 阶段2模型

在2.1节的阶段1模型中仅对单个车次链的充电策略进行优化, 没有考虑总充电负荷的分布情况, 因此模型求解结果中充电负荷波动可能较大。本节以白天总充电负荷波动最小为优化目标, 以充电成本不大于阶段1的白天充电成本等为约束条件, 建立阶段2的优化模型。

2.3.1 目标函数

阶段2按照阶段1的方法生成每个最优车次链的连续充电时间片段, 并将所有充电时间片段按车次链的顺序依次排序, 总充电时间片段数 W 为:

$$W = \sum_{p'=1}^{J'} \sum_{l=1}^{L_{p'}} \sum_{j=1}^{\phi_{l,j}^{p'}} \delta_{l,j}^{p'} \quad (23)$$

其中, p' 、 J' 分别为最优车次链编号和数量。阶段2以平抑负荷波动为优化目标, 目标函数为^[10]:

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{w=1}^W T_t^w \varphi_w \right)^2 \quad (24)$$

其中, T_t^w 为0-1型变量, 表示充电时间片段 w 是否包

含时段 t ,若包含则取值为1,否则取值为0; φ_w 为0-1型变量,表示充电时间片段 w 是否被选中,若被选中则取值为1,否则取值为0。

2.3.2 约束条件

除了需满足2.1.2节中的约束条件外,阶段2还需满足以下约束条件。

(1) 充电成本约束。

阶段2的白天充电成本应不大于阶段1的白天充电成本,即:

$$\sum_{p'=1}^{J'} C_{d*}^{p'} \leq \sum_{p'=1}^{J'} C_d^{p'} \quad (25)$$

$$C_{d*}^{p'} = f_w \varphi_w \quad (26)$$

其中, $C_{d*}^{p'}$ 、 $C_d^{p'}$ 分别为最优车次链 p' 在阶段2、阶段1的白天充电成本; f_w 为充电时间片段 w 的充电成本。

(2) 充电功率约束。

任一时段的总充电功率应不大于系统允许的充电功率,即:

$$P \sum_{w=1}^W T_t^w \varphi_w \leq A_t \quad t=1, 2, \dots, T \quad (27)$$

其中, A_t 为时段 t 系统允许的充电功率。上述充电功率约束也可以表示为场站可投入的充电桩数量约束,限于篇幅不再赘述。

2.4 最优车次链夜间充电二次规划模型

2.4.1 目标函数

因夜间的分时电价不变,每个车次链在夜间仅进行一次充电,为了减少连续充电时间片段的规模,首先,根据阶段1(或阶段2)模型求出每条车次链在白天的充电电量,进而计算得到每条车次链在白天的充电需求量,据此计算夜间连续充电时间片段长度;然后,枚举该长度的夜间充电时间片段数,并将所有可行充电时间片段按车次链顺序进行编号;最后,以充电负荷波动最小为夜间充电的优化目标,如式(28)所示^[10]。

$$\min \sum_{t=T_m}^{T_n} \left(\sum_{w=1}^{W'} T_t^w Q_w \right)^2 \quad (28)$$

其中, W' 为车次链在夜间充电的总时间片段数; T_n 为最早的车次任务开始前一个时段,规定此时夜间充电任务全部完成; T_m 为夜间充电开始时段; Q_w 为0-1型决策变量,表示连续充电时间片段 w 是否在最终解中,若在则取值为1,否则取值为0。

2.4.2 约束条件

每个车次链在夜间只能进行一次连续性充电,即需满足式(29)所示约束。

$$\sum_{w=s_{p'}}^{e_{p'}} Q_w = 1 \quad p'=1, 2, \dots, J' \quad (29)$$

其中, $s_{p'}$ 、 $e_{p'}$ 分别为最优车次链 p' 的夜间充电时间片段在所有夜间充电时间片段中的开始编号、结束编号。

2.5 无序充电模型

在车次链确定的情况下,本文将无序充电定义为:当执行最优车次链的电动公交车进站时,不考虑分时电价机制,只要有充电桩空间,则进行充电,直至动力电池满电或者发车为止。对于最优车次链 p' 而言,其在1 d中的完整进站次数为 $L_{p'}$,第 l' 次进站、出站的时段分别为 $s_{l'}^{p'}$ 、 $e_{l'}^{p'}$,则电动公交车在该次进站、出站期间的充电电量 $E_d^{p'}$ 和充电成本 $C_d^{p'}$ 分别为:

$$E_d^{p'} = \sum_{l'=1}^{L_{p'}} \sum_{t=s_{l'}^{p'}+1}^{s_{l'}^{p'}+\Delta d_{l'}^{p'}+1} E_{\Delta t} \quad (30)$$

$$C_d^{p'} = \sum_{l'=1}^{L_{p'}} \sum_{t=s_{l'}^{p'}+1}^{s_{l'}^{p'}+\Delta d_{l'}^{p'}+1} E_{\Delta t} f_t \quad (31)$$

其中, $\Delta d_{l'}^{p'}$ 为无序充电模式下执行最优车次链 p' 的电动公交车第 l' 次进站、出站期间的充电持续时间。首先根据式(14)求得最优车次链 p' 第 l' 次进站时动力电池电量 $E_{x,l'}^{p'}$,然后按照下述步骤求解 $\Delta d_{l'}^{p'}$ 。

(1)根据式(32)求解最大连续可充电时间长度 $\Delta t_{l',1}^{p'}$ 。

$$\Delta t_{l',1}^{p'} = (E_{std} - E_{x,l'}^{p'}) / E_{\Delta t} - \Delta T_{l'}^{p'} \quad (32)$$

其中, $\Delta T_{l'}^{p'}$ 为最优车次链 p' 第 l' 次进站、出站期间因没有充电桩空闲而不能充电的时段数。

(2)根据式(33)求解最大连续能充电时间长度 $\Delta t_{l',2}^{p'}$ 。

$$\Delta t_{l',2}^{p'} = s_{l'}^{p'} - e_{l'}^{p'} - 2 - \Delta T_{l'}^{p'} \quad (33)$$

(3)根据式(34)计算 $\Delta d_{l'}^{p'}$ 。

$$\Delta d_{l'}^{p'} = \min \{ \Delta t_{l',1}^{p'}, \Delta t_{l',2}^{p'} \} \quad (34)$$

上述计算公式也适用于电动公交车最后一次进站充电的情况,只需要将 $e_{l'}^{p'}$ 设为第二天车次链发车的前一个时段即可,最优车次链其他成本的计算过程与阶段1、阶段2相同,此处不再赘述。

3 异常情况处理策略

季节变化会改变单位行驶里程的耗电量,如电动公交车在夏季开空调,必然会增加耗电量,此时首先需要将模型中的单位行驶里程耗电量调整为夏季对应数值,重新生成可行车次链,然后根据模型重新求解最优车次链及其两阶段充电策略。在确定车次链和充电策略后,当电动公交车在执行车次链的过程中出现由路况拥堵、天气剧烈变化、变压器或者线路容量限制等突发原因而导致的提前进站、推迟进站,且进站后无法执行原有充电计划或者执行原有充电计划后无法完成后续车次任务的情况时,需对原有充电计划进行修正。本文采用如下修正策略:将出现异常情况的车次链的后续充电计划从系统中独立出来进行单独处理,若电动公交车执行的是阶段2生成的充电计划,则使用阶段1的优化策略对其后续充电计划重新进行优化,这样并不会影响

到其他车次链的充电计划,从而将出现异常情况时的影响降至最低。根据充电桩的充电功率是否可调^[10],本文所提异常情况处理策略流程见图1。

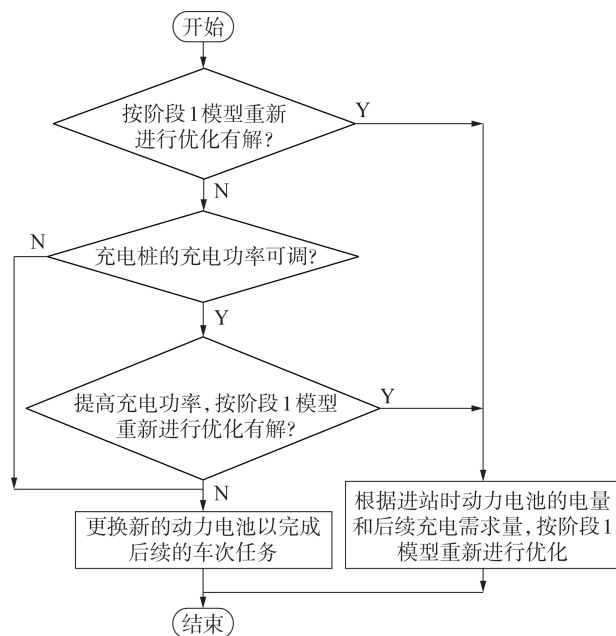


图1 异常情况处理策略流程图

Fig.1 Flowchart of abnormal situation handling strategy

4 算例分析

4.1 仿真场景和参数设置

某条公交车线路的相关参数和车次任务分别见附录中表A1和表A2。车场有6个全天都能投入使用的直流快速充电桩。充电桩功率 $P=150\text{ kW}$,充电桩的充电效率 $\eta=0.9$, $T_m=1$, $T_n=71$, $M=58$, $N=18$ 辆, $A_i=900\text{ kW}$, $E_{\min}=0.2E_{\text{std}}$, $E_{\max}=E_{\text{std}}$, $T=288$, $\Delta t=5\text{ min}$ 。电动公交车的主要成本参数取值与普通燃油公交车基本相同^[16],具体见附录中表A3。其中单位时段内载客运行成本包括车辆保养维修费用和公交车司乘人员工资等成本。充电站的购电分时电价取自北京市电网峰谷分时销售电价^[8],如附录中表A4所示。

4.2 有序充电策略求解结果及分析

本文所提有序充电策略求解流程图见附录中图A1,代入上述仿真场景和参数,在MATLAB 2016环境下编写相应的优化程序并调用Gurobi8.0.1优化器进行求解,在处理器为Intel(R) Core(TM) i5-4200、主频为2.5 GHz的个人计算机上编程以实现上述优化过程。最优车次链优化结果如附录中表A5所示。由表A5可看出,因一辆电动公交车执行一个车次链,所以共需要16辆电动公交车才能完成该公交线路的运营计划,少于该车场拥有的电动公交车数量。有序充电阶段1、阶段2模型和夜间充电二次规划模型所求最优车次链的最优充电计划见附录中表A6。

其中车次链1和车次链2在阶段1、阶段2、夜间的充电功率如图2所示。充电电量、充电成本和充电时间的对应关系分别见附录中表A7、表A8。最优车次链的充电成本、运行成本、等待成本、固定成本和总运营成本见附录中表A9。

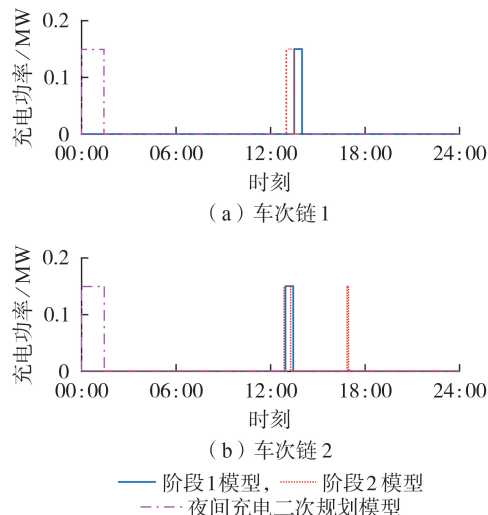


图2 车次链1、车次链2的充电功率

Fig.2 Charging power of vehicle chain 1 and 2

由图2可看出,各车次链都在白天平峰时段和夜间谷时段进行充电,阶段1、阶段2模型均达到了使充电成本降低的目的。同时阶段1、阶段2白天充电电量和充电成本均相同,但充电时间不同,这是因为阶段1仅考虑充电成本最低进行优化,没有考虑整体负荷波动情况,而阶段2不仅考虑了充电成本最低,且其优化目标为总充电负荷波动最小。因二者夜间充电优化模型参数相同,故夜间充电策略完全相同。

以执行车次链1的电动公交车为例,其在阶段2模型下的SOC与行驶里程的关系如图3所示。

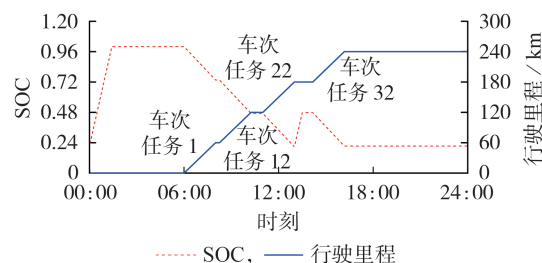


图3 电动公交车的SOC与行驶里程的关系

Fig.3 Relationship between SOC and mileage of electric bus

由图3可看出,执行车次链1的电动公交车在白天的13:00—13:30时段充电,此时处于电价平峰时段。充电前其已完成车次任务1、12、22,SOC降至0.208,已不足以完成车次任务32,在13:00—13:30时段补充67.5 kW·h电能后SOC提高至0.478,完成

车次任务32后SOC降至0.214,大于动力电池允许的SOC下限0.2。在夜间00:00—01:25时段充电后SOC提高至1。电动公交车在1d内的总行驶里程为240 km。

有序充电策略的总充电功率如图4所示。由图4和附录中表A4可知,阶段1、阶段2模型均未在分时电价高峰时段充电,充电过程集中在分时电价平峰时段和夜间电价低谷时段,且充电高峰时段发生在夜间,共投入4个充电桩,夜间充电负荷波动小。充电阶段1、阶段2在白天使用的充电桩最大数量分别为3、2个。阶段2的白天充电负荷波动比阶段1小,故可优选阶段2模型作为充电策略。

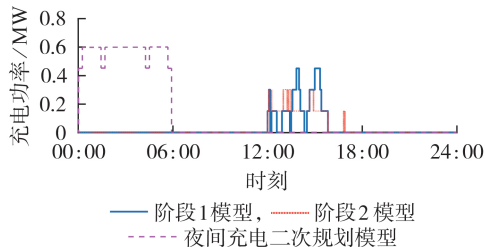


图4 有序充电策略的总充电功率

Fig.4 Total charging power of coordinated charging strategy

4.3 异常情况处理案例分析

以车次链1为例,在完成车次任务1、12后,电动公交车的正常耗电量为132 kW·h。假设天气变化、路况拥堵等原因导致车辆完成车次任务12后进站时间推迟了10 min,耗电量增加了18 kW·h,总耗电量达到150 kW·h,若电动公交车在本次进站、出站期间仍执行原有充电计划不进行充电,则执行后续车次任务22后动力电池电量将降至34 kW·h,将低于动力电池允许的最低容量限值50 kW·h,因此本次进站、出站期间必须进行充电作业。假设充电桩的充电功率不可调,根据图1所示异常情况处理策略,将上述参数代入阶段1模型,可以得出车次链1的充电功率如图5所示。

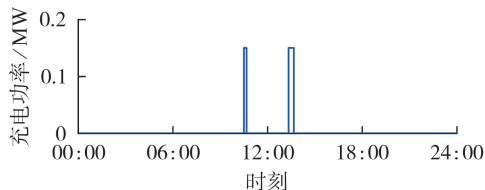


图5 异常情况下车次链1的充电功率

Fig.5 Charging power of vehicle chain 1 under abnormal situation

由图5可知,由于异常情况发生在分时电价高峰时段,为了完成车次任务22,此时需要在电价高峰时段进行短时充电,需求量为16 kW·h,而其余大部分充电任务仍在电价平峰时段进行。本次针对异

常情况的处理仅对车次链1的后续充电计划进行调整,并不改变其他车次链的充电计划,从而将异常情况的影响降至最小。

4.4 无序充电求解结果及分析

在求得最优车次链的基础上,将其代入2.5节中的无序充电模型,在MATLAB 2016环境下编写相应的程序,计算得到无序充电的充电时段、充电时间、充电电量和充电成本,结果见附录中表A10。

无序充电策略下车次链1、2的充电功率如图6所示,总充电功率如图7所示。由图6可知,无序充电策略下单个车次链的充电行为被分为若干段,充电行为较为频繁。由图7可知,无序充电策略的充电行为主要发生在白天电价平峰时段和高峰时段,总体充电的经济性较差,最大充电桩使用数量为6个,与车场拥有的充电桩数量相等。

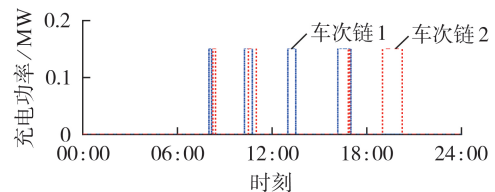


图6 无序充电下单个车次链的充电功率

Fig.6 Charging power of single vehicle chain under uncoordinated charging

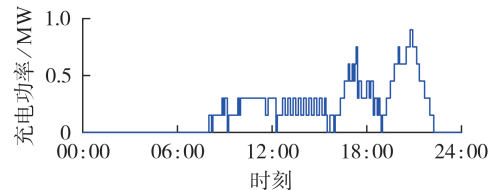


图7 无序充电的总充电功率

Fig.7 Total charging power of uncoordinated charging

有序充电和无序充电策略的充电电量和成本如表1所示。表中,由于有序充电策略阶段1和阶段2的充电成本和充电电量均相同,将其统称为有序充电策略。由表1可知,与无序充电相比,有序充电能节约86%的充电成本,充电经济性良好。

表1 2种充电策略的充电电量和成本

Table 1 Charging energy and cost of two charging strategies

充电策略	充电电量/(kW·h)			充电成本/元		
	白天	夜间	总和	白天	夜间	总和
有序充电	675	3153	3828	515	1277	1792
无序充电	3828	0	3828	3345	0	3345

有序充电和无序充电策略的总运营成本如表2所示。由表2可知,相较于无序充电策略,本文所提两阶段有序充电策略可节约11%的运营成本,可见本文所提策略具有良好的运营经济性。

表2 2种充电策略的总运营成本对比

Table 2 Comparison of total operation cost between two charging strategies

单位:元					
充电策略	载客运行成本	充电成本	车场等待成本	固定成本	总运营成本
有序充电	5568	1792	94	6400	13854
无序充电	5568	3345	94	6400	15407

5 结论

为了提高电动公交车的运营经济性,兼顾电网和公交车2个利益主体,本文在制定充电策略时考虑了行车计划编制问题,建立了电动公交车行车计划编制和充电策略优化模型,所得结论如下。

(1)将行车计划编制问题中的生成-选择法和间隙式快速充电策略相结合,既能满足公交车公司制定行车计划的需求,又能充分响应电网的分时电价机制,达到节约充电成本和平抑负荷波动的目的。当电动公交车在运营过程中出现异常情况时仅需对该车次链的后续充电策略进行调整,无需改变其他车次链的充电计划,从而将异常情况的影响降至最低,显示出良好的适应性。

(2)以一条电动公交车线路的行车计划和充电策略编制问题为例,将线路参数代入所建优化模型,求解得到该公交线路的最优车次链及其两阶段充电策略的充电时间、充电成本及总运营成本等参数。将求解结果与无序充电策略的求解结果进行对比,结果显示:相较于无序充电策略,本文所提两阶段有序充电策略的充电成本和总运营成本分别降低了86%、11%,显示了良好的经济性。同时,有序充电阶段2模型还能降低电网负荷峰谷差,平抑充电负荷波动,故优先推荐其作为优选充电策略。

(3)有序充电策略和无序充电策略下的充电桩使用数量分别由夜间充电需求量和白天充电需求量确定,充电桩数量需满足相应模型的需求。

(4)公交车公司根据求解结果依次执行车次链中的所有车次任务,求解结果边界清晰,针对异常情况的处理策略简单方便,符合公交车公司的调度习惯,具有一定的应用价值。

需要指出的是,本文所提策略和模型仅适用于解决中等规模及以下的车次链生成问题,对于车次链规模较大的区域调度计划和充电策略编制问题,还需要采取其他优化算法加以解决,这将是今后的主要研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 刘文霞,龙日尚,徐晓波,等. 考虑数据新鲜度和交叉熵的电动汽车短期充电负荷预测模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):45-52.

LIU Wenxia, LONG Rishang, XU Xiaobo, et al. Forecasting model of short-term EV charging load based on data freshness and cross entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 45-52.

[2] 王浩林,张勇军,毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):207-213.

WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 207-213.

[3] 孙乾,许珊,朱妹豫,等. 考虑DG时序特性及EV时空特性的配电网规划[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):30-38.

SUN Qian, XU Shan, ZHU Shuyu, et al. Distribution network planning considering DG timing characteristics and EV spatio-temporal characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 30-38.

[4] 王毅,陈进,麻秀,等. 采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):77-85.

WANG Yi, CHEN Jin, MA Xiu, et al. Interactive scheduling strategy between electric vehicles and power grid based on group optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 77-85.

[5] 葛少云,朱林伟,刘洪,等. 基于动态交通仿真的高速公路电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报,2018,33(13):2991-3001.

GE Shaoyun, ZHU Linwei, LIU Hong, et al. Optimal deployment of electric vehicle charging stations on the highway based on dynamic traffic simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 2991-3001.

[6] 孟旭瑶,张维戈,鲍谚,等. 考虑充电功率的电动汽车快充站充电设施优化配置[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):28-34.

MENG Xuyao, ZHANG Weige, BAO Yan, et al. Optimal configuration of charging facility for electric vehicle fast charging station considering charging power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 28-34.

[7] 杨健维,董鸿志,廖凯,等. 计及电动汽车辅助调频的负荷频率控制联合优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):200-206.

YANG Jianwei, DONG Hongzhi, LIAO Kai, et al. Joint optimization of load frequency control considering auxiliary frequency regulation of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 200-206.

[8] 李斌,刘畅,陈慧妙,等. 基于混合整数规划的电动公交车快速充电站有序充电策略[J]. 电网技术,2016,40(9):2623-2630.

LI Bin, LIU Chang, CHEN Huimiao, et al. Coordinated charging of plug-in electric buses in fast charging stations based on mixed-integer programming[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2623-2630.

[9] 杨少兵,吴命利,姜久春,等. 快换式电动公交充电站经济运行优化策略[J]. 电网技术,2014,38(2):335-340.

YANG Shaobing, WU Mingli, JIANG Jiuchun, et al. Optimal strategy for economic operation of electric bus battery swapping station[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 335-340.

[10] 杨健维,杨鹤,张夏霖,等. 基于换电规则优化与车辆-电池组匹配的电动公交车充换电站充电优化策略[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2337-2347.

YANG Jianwei, YANG He, ZHANG Xialin, et al. A charging optimization strategy on charging and swapping station for electric buses based on optimization of switching rules and matching of buses and batteries[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2337-2347.

[11] 杨昕然,吕林,向月,等. “车-路-网”耦合下电动汽车恶劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):102-108,122.

YANG Xinran, LÜ Lin, XIANG Yue, et al. Degradation char-

- ging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under "EV-road-grid" coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 102-108, 122.
- [12] 滕靖, 林琳, 陈童. 纯电动公交时刻表和车辆排班计划整体优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 1748-1755. TENG Jing, LIN Lin, CHEN Tong. Optimizing the combination of timetable and vehicle scheduling for pure electric buses[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(12): 1748-1755.
- [13] 姚恩建, 卢沐阳, 刘宇环, 等. 考虑充电约束的电动公交区域行车计划编制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 68-73. YAO Enjian, LU Muyang, LIU Yuhuan, et al. Electric bus area driving plan preparation considering charging constraints[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(9): 68-73.
- [14] 唐春艳, 杨凯强, 邹娜. 单线纯电动公交车柔性调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(3): 156-162. TANG Chunyan, YANG Kaiqiang, WU Na. Optimizing flexible vehicle scheduling for single-line battery electric buses[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(3): 156-162.
- [15] 杨扬, 关伟, 马继辉. 基于列生成算法的电动公交车调度计划优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 198-204. YANG Yang, GUAN Wei, MA Jihui. Battery electric transit bus scheduling problem based on column generation approach[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(5): 198-204.
- [16] 李晋. 基于时空网络的城市常规公交多车场车辆调度问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. LI Jin. Research on multiple depot vehicle scheduling pro-

blem of urban bus system based on the time-space network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

- [17] 刘志刚, 申金升, 杨威. 基于禁忌搜索的公交区域调度配车模型研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2007, 5(4): 63-67. LIU Zhigang, SHEN Jinsheng, YANG Wei. Regional bus scheduling model based on taboo search[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2007, 5(4): 63-67.
- [18] 财政部, 科技部, 工业和信息化部. 发展改革委关于调整新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知[EB/OL]. (2016-12-29)[2020-11-09]. http://www.zjjxw.gov.cn/art/2017/1/24/art_1208081_64.html.

作者简介:



蔡子龙

蔡子龙(1976—), 男, 云南宣威人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为电动汽车充电站规划、V2G、信息技术在电力系统中的应用(E-mail: 1250582439@qq.com);

束洪春(1961—), 男, 江苏丹阳人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波和数字信号处理器及其应用(E-mail: kmshe@sina.com.cn);

杨博(1988—), 男, 云南昆明人, 教授, 博士, 主要研究方向为新能源发电系统优化与控制以及人工智能在智能电网中的应用(E-mail: yangbo_ac@outlook.com);

单节杉(1979—), 男, 云南昆明人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统新型控制与保护(E-mail: 736495310@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Coordinated charging strategy of electric bus considering driving plan

CAI Zilong, SHU Hongchun, YANG Bo, SHAN Jieshan

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to improve the economy of electric bus and take into account the benefits of public transport and power grid, the charging strategy and driving plan of electric bus should be considered comprehensively. Firstly, feasible vehicle chains satisfying the constraints of time connection relationship and battery capacity are generated, and the coordinated charging stage 1 model of feasible vehicle chain with the minimum charging cost as its optimization objective and the optimal vehicle chain selection model with the minimum total operation cost as its optimization objective are established. Then, with the minimum fluctuation of charging load during the day and night as the optimization objective, the coordinated charging stage 2 model and the quadratic programming model of night charging for the feasible vehicle chain are established respectively. Finally, taking a bus line as the example to verify the proposed model, the results show that the proposed model and method can meet the demand of bus companies to make driving plans, achieve the goal of the lowest total operation cost of electric buses, and achieve the purpose of reducing charging cost and suppressing charging load fluctuation through coordinated charging, which has important reference value for guiding electric buses to make charging strategy and driving plan.

Key words: electric bus; driving plan; charging strategy; coordinated charging; time-of-use electricity price; vehicle chain

附录

表 A1 公交线路参数
Table A1 Parameters of bus line

参数	取值	参数	取值
线路里程/km	60	平均每公里耗电量/(kW·h·km ⁻¹)	1.1
平均运行速度/(km·h ⁻¹)	30	电池组容量/(kW·h)	250

表 A2 电动公交车的发车时刻
Table A2 Departure schedule of electric bus

车次号	出发时刻	到达时刻	车次号	出发时刻	到达时刻	车次号	出发时刻	到达时刻	车次号	出发时刻	到达时刻
1	06:00	08:00	16	09:15	11:15	31	13:40	15:40	46	15:52	17:52
2	06:12	08:12	17	09:30	11:30	32	14:00	16:00	47	16:15	18:15
3	06:24	08:24	18	09:45	11:45	33	14:08	16:00	48	16:30	18:30
4	06:36	08:36	19	10:00	12:00	34	14:16	16:16	49	16:45	18:45
5	06:48	08:48	20	10:20	12:20	35	14:24	16:24	50	17:00	19:00
6	07:00	09:00	21	10:40	12:40	36	14:32	16:32	51	17:15	19:15
7	07:12	09:12	22	11:00	13:00	37	14:40	16:40	52	17:30	19:30
8	07:24	09:24	23	11:20	13:20	38	14:48	16:48	53	17:45	19:45
9	07:36	09:36	24	11:40	13:40	39	14:56	16:56	54	18:00	20:00
10	07:48	09:48	25	12:00	14:00	40	15:04	17:04	55	18:15	20:15
11	08:00	10:00	26	12:20	14:20	41	15:12	17:12	56	18:30	20:30
12	08:15	10:15	27	12:40	14:40	42	15:20	17:20	57	18:45	20:45
13	08:30	10:30	28	13:00	15:00	43	15:28	17:28	58	19:00	21:00
14	08:45	10:45	29	13:20	15:20	44	15:36	17:36			
15	09:00	11:00	30	13:40	15:40	45	15:44	17:44			

表 A3 成本参数
Table A3 Cost parameters

参数	取值
固定成本/元	400
单位时段载客运行成本/元	4
车场内单位时段等待成本/元	0.2

表 A4 分时电价
Table A4 Time-of-use electricity price

时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
低谷	00:00—08:00 0.365
高峰	08:00—12:00, 17:00—21:00 0.869
平峰	12:00—17:00, 21:00—24:00 0.687

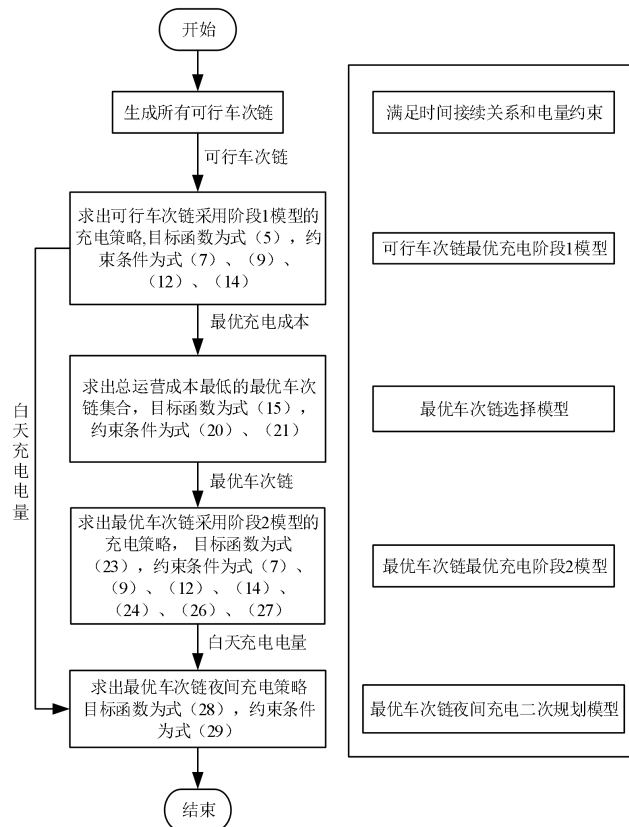


图 A1 优化充电策略的求解流程图
Fig.A1 Flowchart of solving optimal charging strategy

表 A5 最优车次链
Table A5 Optimal vehicle chains

编号	车次链	编号	车次链
1	1-12-22-32	9	9-19-26-41-52
2	2-13-37-50	10	10-20-39
3	3-14-23-36	11	11-21-40
4	4-38-51	12	29-42-53
5	5-15-25-45	13	30-46-55
6	6-16-24-34	14	31-47-56
7	7-17-27-44-54	15	33-48-57
8	8-18-28-43	16	35-49-58

表 A6 最优车次链有序充电计划
Table A6 Coordinated charging plan of optimal vehicle chains

车次链编号	白天充电时段		夜间充电时段 (二次规划模型)
	阶段 1 模型	阶段 2 模型	
1	13:31—14:00	13:01—13:30	00:01—01:25
2	13:01—13:30	12:51—13:15, 15:51—15:55	00:01—01:25
3	13:36—14:05	13:21—13:50	01:41—03:05
4	—	—	04:16—05:40
5	15:21—15:50	15:21—15:50	03:06—04:30
6	13:56—14:25	13:51—14:20	04:31—05:55
7	14:41—15:20	12:36—12:50, 15:06—15:20	01:26—02:50
8	12:06—12:10, 15:01—15:20	12:36—12:50, 15:06—15:20	04:31—05:55
9	12:01—12:10, 14:31—15:20	12:01—12:15, 14:21—15:05	00:16—01:40
10	—	—	02:56—04:15
11	—	—	01:41—03:05
12	—	—	00:01—01:25
13	—	—	02:56—04:15
14	—	—	04:31—05:55
15	—	—	01:31—02:50
16	—	—	03:06—04:35

表 A7 有序充电阶段 1 的充电时段、充电电量和充电成本
Table A7 Charging period,charging energy and charging cost of coordinated charging stage 1

编号	白天充电			夜间充电		
	充电时段	充电电量/(kW·h)	充电成本/元	充电时段	充电电量/(kW·h)	充电成本/元
1	13:31—14:00	68	51	00:01—01:25	197	80
2	13:01—13:30	68	51	00:01—01:25	197	80
3	13:36—14:05	68	51	01:41—03:05	197	80
4	—	0	0	04:16—05:40	197	80
5	15:21—15:50	68	51	03:06—04:30	197	80
6	13:56—14:25	68	51	04:31—05:55	197	80
7	14:41—15:20	135	103	01:26—02:50	195	79
8	12:06—12:10, 15:01—15:20	68	51	04:31—05:55	197	80
9	12:01—12:10, 14:31—15:20	135	105	00:16—01:40	195	79
10	—	0	0	02:56—04:15	198	80
11	—	0	0	01:41—03:05	198	80
12	—	0	0	00:01—01:25	198	80
13	—	0	0	02:56—04:15	198	80
14	—	0	0	04:31—05:55	198	80
15	—	0	0	01:31—02:50	198	80
16	—	0	0	03:06—04:35	198	80

表 A8 有序充电阶段 2 的充电时段、充电电量和充电成本
Table A8 Charging period,charging energy and charging cost of coordinated charging stage 2

编号	白天充电			夜间充电		
	充电时段	充电电量/(kW·h)	充电成本/元	充电时段	充电电量/(kW·h)	充电成本/元
1	13:01—13:30	68	51	00:01—01:25	197	80
2	12:51—13:1515:51—15:55	68	51	00:01—01:25	197	80
3	13:21—13:50	68	51	01:41—03:05	197	80
4	—	0	0	04:16—05:40	197	80
5	15:21—15:50	68	51	03:06—04:30	197	80
6	13:51—14:20	68	51	04:31—05:55	197	80
7	12:36—12:50, 15:06—15:20	135	103	01:26—02:50	195	79
8	12:36—12:50, 15:06—15:20	68	51	04:31—05:55	197	80
9	12:01—12:15, 14:21—15:05	135	105	00:16—01:40	195	79
10	—	0	0	02:56—04:15	198	80
11	—	0	0	01:41—03:05	198	80
12	—	0	0	00:01—01:25	198	80
13	—	0	0	02:56—04:15	198	80
14	—	0	0	04:31—05:55	198	80
15	—	0	0	01:31—02:50	198	80
16	—	0	0	03:06—04:35	198	80

表 A9 有序充电阶段 1、阶段 2 的成本
Table A9 Cost of coordinated charging stage 1 and stage 2

编号	充电成本/元	载客运行成本/元	车场等待成本/元	固定成本/元	总运营成本/元
1	131	384	6	400	921
2	131	384	12	400	927
3	131	384	6	400	921
4	80	288	16	400	784
5	131	384	8	400	923
6	131	384	4	400	919
7	182	480	6	400	1068
8	131	384	6	400	921
9	182	480	4	400	1066
10	80	288	8	400	776
11	80	288	8	400	776
12	80	288	2	400	770
13	80	288	2	400	770
14	80	288	2	400	770
15	80	288	2	400	770
16	80	288	2	400	770

表 A10 无序充电的充电时段、充电时间、充电电量和充电成本
Table A10 Charging time,charging energy and charging cost of uncoordinated charging

车次链	充电时段	充电情况		
		充电时间	充电电量/ (kW·h)	充电 成本/元
1	97, 98, 124—129, 157—162, 195—204	08:01—08:10, 10:16—10:45, 13:01—13:30 (运行期间); 16:11—17:00 (停运后)	155; 110	135.7; 80.6
2	100, 101, 127—132, 203, 229—243	08:16—08:25, 10:31—11:00, 16:51—16:55 (运行期间); 20:00—20:55 (停运后)	100; 164	94; 155
3	102—104, 130—135, 161—166, 201—209	08:26—08:40, 10:46—11:15, 13:26—13:55 (运行期间); 16:41—17:25 (停运后)	166; 98	147; 81
4	105—110, 205, 206, 232—241	08:41,09:10, 17:01—17:10 (运行期间); 19:16—20:05 (停运后)	89; 110	85.4; 101
5	107, 133—138, 169—174, 216—226	08:51—08:55, 11:01—11:30, 14:01—14:30 (运行期间); 18:01—28:55 (停运后)	143; 121	125; 112
6	109, 110, 136—139, 165—170, 198—209	09:01—09:10, 11:16—11:35, 13:41—14:10 (运行期间); 16:31—17:30 (停运后)	134; 131	115; 106
7	112, 113, 139—144, 177—182, 214, 215, 241—254	09:16—09:25, 11:31—12:00, 14:41—15:10, 17:46—17:55 (运行期间); 20:01—21:10 (停运后)	177; 153	157; 142
8	114—116, 14—147, 181—186, 213—221	09:26—09:40, 11:46—12:15, 15:01—15:30 (运行期间); 17:41—18:25 (停运后)	166; 98	140; 90
9	117—119, 145—147, 17—178, 209, 235—251	09:41—09:55, 12:01—12:15, 14:21—14:50, 17:21—17:25 (运行期间); 19:31—18:55 (停运后)	145; 185	120; 176
10	119—123, 149—154, 206—212	9:51—10:15, 12:21—12:50 (运行期间); 17:01—17:35 (停运后)	122; 76	105; 69
11	121—126, 153—158, 208—213	10:01—10:30, 12:41—13:10 (运行期间); 17:16—17:45 (停运后)	132; 66	114; 58
12	185, 211, 212, 238—252	15:21—15:25, 17:31—17:40 (运行期间); 19:46—21:00 (停运后)	34; 164	30; 155
13	189—191, 217, 218, 244—256	15:41—15:55, 18:01—18:10 (运行期间); 20:16—21:20 (停运后)	56; 142	47.4; 126
14	193, 194, 220, 221, 247—260	16:01—16:10, 18:16—18:25 (运行期间); 20:36—21:45 (停运后)	45 153	39; 128
15	197, 223, 224, 250—264	16:21—16:25, 18:31—18:40 (运行期间); 17:46—18:10 (停运后)	34; 164	30; 130
16	200, 226, 227, 253—267	16:36—16:40, 18:46—18:55 (运行期间); 21:01—22:15 (停运后)	34; 164	30; 123