

控制与决策

Control and Decision

考虑差异化需求的电动汽车充电调度策略

蔡凌, 郭戈, 施冷安东

引用本文:

蔡凌, 郭戈, 施冷安东. 考虑差异化需求的电动汽车充电调度策略[J]. *控制与决策*, 2024, 39(3): 795–803.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1140>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[电动汽车时代的电网-交通网协同优化综述](#)

A survey of cooperative optimization of traffic-grid networks in the era of electric vehicles

控制与决策. 2021, 36(9): 2049–2062 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1736>

[基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度](#)

Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm

控制与决策. 2021, 36(11): 2751–2759 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523>

[敏感度函数未知下的非均匀直线覆盖控制算法设计与PLEXE仿真](#)

Nonuniform line coverage control for a group of unmanned vehicles with unknown density function and its simulation in PLEXE

控制与决策. 2021, 36(9): 2095–2102 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1268>

[基于Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法](#)

Trajectory planning and optimization algorithm for automated driving based on Frenet coordinate system

控制与决策. 2021, 36(4): 815–824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0748>

[无人飞行器航迹方案的VIKOR择优评价](#)

Unmanned aerial vehicle path scheme optimal evaluation based-VIKOR

控制与决策. 2020, 35(12): 2950–2958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0415>

考虑差异化需求的电动汽车充电调度策略

蔡凌[†], 郭戈, 施冷安东

(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 电动汽车行驶里程短、充电时间长是影响驾驶体验的关键。通过对电网、充电设备进行大规模升级的方法减少充电时间, 成本昂贵, 因此充分利用现有路网、电网资源, 制定智能充电调度策略成为提高驾驶体验的重要手段。考虑到驾驶者对充电时间敏感度的异质性, 提出具有差异化的调度策略以满足不同优先级驾驶者的需求。首先, 为均衡不同优先级驾驶者的利益, 提出一种基于动态截断机制的两优先级队列模型; 其次, 定义充电站的准入原则, 保证高优先级驾驶者对预留桩的使用权及对空闲桩的优先抢占权; 然后, 提出基于截断机制的双层优化模型 CCPQ (charging with cut-off priority queue), 在顶层高优先级车辆与充电桩最优匹配的基础上, 设计底层低优先级车辆的分配策略优化模型, 将最小化低优先级驾驶者的总等待时间构建为凸优化问题; 最后, 通过仿真验证策略的有效性及其优越性。

关键词: 电动汽车; 充电策略; 区分服务; 预约; 截断优先级队列; 凸优化

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1140

引用格式: 蔡凌, 郭戈, 施冷安东. 考虑差异化需求的电动汽车充电调度策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 795-803.

Electric vehicle charging scheduling strategy considering differentiated demand

CAI Ling[†], GUO Ge, SHI Leng-an-dong

(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Limited drivable range and long charging duration are the key hurdles for electric vehicles (EVs) to provide an acceptable driving experience. The solution for reducing charging duration is a significant upgrade in power networks to accommodate a widespread installation of chargers. Such an upgrade can be too expensive, hence, formulating intelligent charging scheduling strategy becomes an important means to improve driving experience after making sure that existing road network resources and power networks resources are efficiently utilized. Considering the heterogeneity of drivers' sensitivity to charging duration, this paper proposes a differentiated scheduling strategy for drivers with different priorities. Firstly, to balance the benefits of drivers with different priorities, a two-priority queuing model based on dynamic cut-off mechanism is proposed. Secondly, the admission principle of charging station is defined to ensure that high-priority drivers have the right to use the reserved chargers or to preempt the idle chargers. Then, a two-tier optimization model CCPQ (charging with cut-off priority queue) is proposed. Based on the optimal matching model for high-priority vehicles and charging chargers on the top tier, an optimal allocation model for low-priority vehicles on bottom tier is designed. Minimizing the total waiting time of low-priority drivers is constructed as a convex optimization problem. Finally, the effectiveness and superiority of the strategy are verified by simulation.

Keywords: electric vehicles; charging strategy; differentiated services; reservation; cut-off priority queuing; convex optimization

0 引言

电动汽车行驶里程相对较短、充电时间较长、充电站分布不均、部分热门充电站存在较长的排队延误等问题成为影响出行体验的主要原因。因此, 充分利用现有充电设施和电网资源制定合理的调度策略,

是提高体验的重要手段之一。

目前, 以用户为导向的电动汽车充电调度主要关注基于能耗^[1-2]、时间成本^[3-5]等的路由策略。但从用户的驾驶体验出发, 研究差异化充电服务的文献却相当有限。依据电池的剩余电量、松弛时间、充电量与

收稿日期: 2022-06-29; 录用日期: 2022-10-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1808205, 62173079).

[†]通讯作者. E-mail: cailing9852@126.com.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览。

充电时间比率^[6]等定义优先级次序是区分服务、体现差异化的常用方法,但考虑的是电网利益,并未兼顾驾驶者的驾驶体验.有些驾驶者对时间较为敏感,只能接受有限的充电等待时间,这种需求的异质性决定了应为用户定义优先级并提供差异化的调度策略.

考虑差异化需求的排队等待时间调度策略,可为不同驾驶者提供不同的驾驶体验,目前却面临以下两方面挑战.

一方面,虽然将采用预约模式的用户定义为高优先级,通过拥有对空闲充电桩的优先抢占权获得优质充电服务质量^[7-8],但是,如何将充电预约整合到抢占式充电服务中,满足差异化的充电等待时间需求,仍未深入研究.显然,先到先得的排队模型M/M/S^[3]、M/G/S^[9]、M/M/S/K^[10]等也不适用于多优先级抢占问题的分析.

另一方面,差异化策略需保证不同优先级用户的公平性,高优先级用户需对充电资源具有优先使用权,低优先级用户的损失应在合理区间,这是调度策略可行性的前提.当电网出现拥塞或过载^[11-12]、停电^[13]等情况时,考虑电力资源公平分配的充电问题已有深入研究,但如何兼顾电动汽车用户和充电站的利益,尤其是交通流量变化时如何在保证充电站利益的前提下,为不同优先级用户公平分配充电资源并未深入探讨.

针对差异化调度问题,文献[14]引入区分服务的概念,但将预期等待时间假设为常数,忽略了到达率对排队等待时间的影响;文献[15]针对抢占式充电调度问题,设计了追求排队等待时间最短、支持充电预约的充电站选择策略,但该策略欠缺对行驶时间的考虑,缺少从不同优先级队列相互影响的角度分析充电资源分配问题.本文首先将对等待时间敏感的电动汽车驾驶者定义为高优先级用户,其余为低优先级,然后利用用户发布的充电需求的时空分布和充电站发布的充电资源的时空分布,建立多优先级队列模型计算不同优先级用户的排队等待时间,最后根据不同优先级用户的行驶成本和排队等待成本分别定义优化目标,匹配用户的充电资源,实现用户利益的最大化.在资源匹配的过程中,通过划分高、低优先级用户可使用的充电资源,保证不同优先级用户的公平性.

本文主要贡献如下:1)提出双层充电调度模型.在顶层,针对充电站给出收益最大的预留桩选择算法,针对优先级用户给出成本损失最小的空闲桩匹配算法;在底层,建立低优先级用户充电等待时间最小的优化模型,并利用拉格朗日函数和KKT条件优化分配结果.2)提出动态截断机制,根据不同的到达率

给出对应的截断值,利用截断值动态划分高、低优先级用户可使用的充电资源,以保证高优先级车辆的排队等待时间,同时定义准入规则保证高优先级车辆对充电资源的优先使用权.

1 问题描述

1) 充电站:定义状态信息 $[s_j, P_j^1(t), P_j^2(t), \dots, P_j^k(t), \dots]$,表示 t 时刻充电站 s_j 中每个充电桩的剩余充电时间,如果充电桩 k 空闲,则 $P_j^k(t) = 0$.

2) 电动汽车:高优先级车辆需支付预约充电费用,定义为预约车辆;低优先级车辆无需支付预约费用,定义为随机车辆.

预约车辆请求格式为 $[EV_i^{\text{res}}, \text{Loc}_i(t), \text{Des}_i(t), \text{SOC}_i(t), \text{CT}_i]$,信息描述了电动汽车 EV_i^{res} 的当前位置 $\text{Loc}_i(t)$ 、终点位置 $\text{Des}_i(t)$ 、剩余电量 $\text{SOC}_i(t)$ 和预约的充电时间 CT_i .

随机车辆请求格式为 $[EV_i^{\text{rad}}, \text{Loc}_i(t), \text{Des}_i(t), \text{SOC}_i(t), [T, T + \Delta t]]$,描述了电动汽车 EV_i^{rad} 的位置 $\text{Loc}_i(t)$ 、终点位置 $\text{Des}_i(t)$ 、剩余电量 $\text{SOC}_i(t)$.充电时间段 $[T, T + \Delta t]$ 为可选项,当 $[T, T + \Delta t]$ 为默认值 0 时, TIC (traffic information center) 将根据车辆的行驶位置及 $\text{SOC}_i(t)$ 推荐充电时间段 $[T, T + \Delta t]$.

3) 队列模型:车辆到达充电站后将分别进入预约请求队列和随机请求队列,因此提出一种基于动态截断机制的两优先级队列模型.截断值 $C_{O_j}(t)$ 将充电站 j 内的充电桩在 t 时刻分为仅供预约车辆使用的预留充电桩组和可供所有车辆选用的随机充电桩组.

预约车辆采用非抢占式优先权算法,即预约车辆只能抢占空闲桩,不能因为优先级较高而抢占正在为随机车辆充电的充电桩.

充电站 s_j 被定义为具有截断值 $C_{O_j}(t)$ 的两优先级队列,该队列表示为具有截断值的马尔可夫链.对于充电站 s_j ,假设任意 t 时刻,预约车辆和随机车辆的到达率 $\lambda_j^{\text{res}}(t)$ 、 $\lambda_j^{\text{rad}}(t)$ 均满足泊松分布,充电服务率 $\mu_j^{\text{res}}(t)$ 、 $\mu_j^{\text{rad}}(t)$ 均满足指数分布.为简化书写,各参数均省略关于时间 t 的定义,队列参数间的数学关系如下:

$$\lambda_j = \lambda_j^{\text{res}} + \lambda_j^{\text{rad}}, \quad (1)$$

$$\mu_j = \mu_j^{\text{res}} = \mu_j^{\text{rad}}, \quad (2)$$

$$\rho_j^{\text{res}} = \lambda_j^{\text{res}} / \mu_j^{\text{res}}, \quad (3)$$

$$\rho_j^{\text{rad}} = \lambda_j^{\text{rad}} / \mu_j^{\text{rad}}, \quad (4)$$

$$\rho_j = \rho_j^{\text{res}} + \rho_j^{\text{rad}}. \quad (5)$$

马尔可夫链的稳态概率

$$\pi_j(N_j^{\text{res}}, N_j^{\text{rad}}, n_j) =$$

$$\begin{cases} \Pr(N_j^{\text{res}}, N_j^{\text{rad}}, n_j), \\ N_j^{\text{res}} \geq 0, N_j^{\text{rad}} \geq 0, 0 \leq n_j \leq C_j; \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

其中: N_j^{res} 、 N_j^{rad} 、 n_j 分别为充电站 s_j 内预约队列长度、随机队列长度、被占用的充电桩数量, C_j 为充电站 s_j 中充电桩的数量. 初始稳态概率为

$$\pi_j(0, 0, 0) = \pi_j^0. \quad (7)$$

由于充电站定义了两优先级队列, 随着车辆的到达, 队列状态都将发生改变, 定义稳态方程如下:

1) 当 $N_j^{\text{res}} = N_j^{\text{rad}} = 0$ 时, 有:

① 如果 $0 \leq n_j < C_{-O_j}$, 则

$$\begin{aligned} &(\lambda_j + n_j \mu_j) \pi_j(0, 0, n_j) = \\ &\lambda_j \pi_j(0, 0, n_j - 1) + (n_j + 1) \mu_j \pi_j(0, 0, n_j + 1); \end{aligned} \quad (8)$$

② 如果 $n_j = C_{-O_j}$, 则

$$\begin{aligned} &(\lambda_j + C_{-O_j} \mu_j) \pi_j(0, 0, C_{-O_j}) = \\ &\pi_j(0, 0, C_{-O_j} - 1) \cdot \lambda_j + (C_j + 1) \mu_j \pi_j(0, 0, C_{-O_j} + \\ &1) + C_j \mu_j \pi_j(0, 1, C_{-O_j}). \end{aligned} \quad (9)$$

2) 当 $N_j^{\text{res}} = 0, N_j^{\text{rad}} > 0$ 时, 有:

① 如果 $n_j = C_{-O_j}$, 则

$$\begin{aligned} &(\lambda_j + C_{-O_j} \mu_j) \pi_j(0, N_j^{\text{rad}}, C_{-O_j}) = \\ &\lambda_j^{\text{rad}} \pi_j(0, N_j^{\text{rad}} - 1, C_{-O_j}) + (C_{-O_j} + \\ &1) \mu_j \pi_j(0, N_j^{\text{rad}}, C_{-O_j} + 1) + \\ &C_{-O_j} \mu_j \pi_j(0, N_j^{\text{rad}} + 1, C_{-O_j}); \end{aligned} \quad (10)$$

② 如果 $C_{-O_j} < n_j < C_j$, 则

$$\begin{aligned} &(\lambda_j + n_j \mu_j) \pi_j(0, N_j^{\text{rad}}, n_j) = \\ &\lambda_j^{\text{res}} \pi_j(0, N_j^{\text{rad}}, n_j - 1) + (n_j + 1) \mu_j \pi_j(0, N_j^{\text{rad}}, n_j + \\ &1) + \lambda_j^{\text{rad}} \pi_j(0, N_j^{\text{rad}} - 1, n_j); \end{aligned} \quad (11)$$

③ 如果 $n_j = C_j$, 则

$$\begin{aligned} &(\lambda_j + C_j \mu_j) \pi_j(0, N_j^{\text{rad}}, C_j) = \\ &\lambda_j^{\text{res}} \pi_j(0, N_j^{\text{rad}}, C_j - 1) + C_j \mu_j \pi_j(0, N_j^{\text{rad}}, C_j) + \\ &\lambda_j^{\text{rad}} \pi_j(0, N_j^{\text{rad}} - 1, C_j). \end{aligned} \quad (12)$$

3) 当 $N_j^{\text{res}} > 0, N_j^{\text{rad}} > 0$ 时, 有

$$\begin{aligned} &(\lambda_j + C_j \mu_j) \pi_j(N_j^{\text{res}}, N_j^{\text{rad}}, C_j) = \\ &\lambda_j^{\text{res}} \pi_j(N_j^{\text{res}} - 1, N_j^{\text{rad}}, C_j) + C_j \mu_j \pi_j(N_j^{\text{res}} + \\ &1, N_j^{\text{rad}}, C_j) + \lambda_j^{\text{rad}} \pi_j(N_j^{\text{res}}, N_j^{\text{rad}} - 1, C_j). \end{aligned} \quad (13)$$

由上述稳态方程可推导出充电站在执行不同数量的充电任务时的稳态概率

$$\pi_j^{n_j} = \begin{cases} \pi_j^0(\rho_j)^{(n_j)} / (n_j)!, & 0 \leq n_j < C_{-O_j}; \\ \frac{\pi_j^0(\rho_j)^{C_{-O_j}} (\rho_j^{\text{res}})^{n_j - C_{-O_j}} C_{-O_j}}{(n_j)! (C_{-O_j} - \rho_j^{\text{rad}} S(C_{-O_j}, C_j))}, & C_{-O_j} \leq n_j < C_j; \\ \frac{\pi_j^0(\rho_j)^{C_{-O_j}} (\rho_j^{\text{res}})^{C_j - C_{-O_j}} C_{-O_j} C_j}{(C_j)! (C_{-O_j} - \rho_j^{\text{rad}} S(C_{-O_j}, C_j)) (C_j - \rho_j^{\text{res}})}, & n_j = C_j. \end{cases} \quad (14)$$

其中^[16-17]

$$\begin{aligned} S(C_{-O_j}, C_j) = &(\rho_j^{\text{rad}})^{-C_{-O_j}} (C_{-O_j})! \cdot \\ &\left[\sum_{i=C_{-O_j}}^{C_j-1} \frac{(\rho_j^{\text{rad}})^i}{i!} + \frac{(\rho_j^{\text{rad}})^{C_j} C_j}{C_j! (C_j - \rho_j^{\text{rad}})} \right]. \end{aligned}$$

2 预约车辆的调度策略

考虑到电动汽车充电时间较长及预约车辆采用非抢占式优先权策略, 存在充电站在预约充电时间无空闲桩的可能. 因此, 预约请求面向整个区域内的所有充电桩, 充电桩等效为多服务器队列.

假设预约充电时间 $CT_i \in [T, T + \Delta t]$, 定义时间点 T 为预约时段的起始, $[T, T + \Delta t]$ 为 T 时间段. 如图 1 所示, 需在 T 时间段完成的预约请求都在 $T - \Delta t$ 时刻进行决策, 决策基于滚动时间槽 ΔT 周期制定, 定义时间槽 ΔT 用于保证预约车辆有足够的时间行驶至充电站及提前预留部分空闲充电桩.

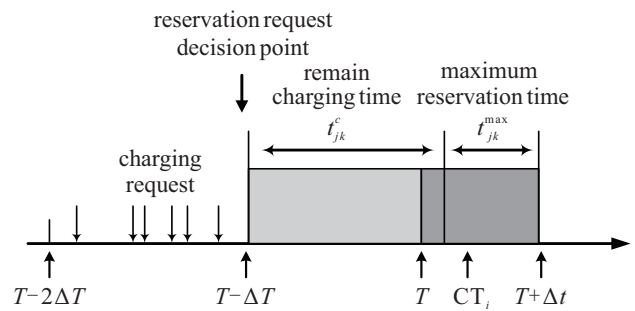


图 1 预约请求的决策时间序列

2.1 截断值的计算模型

根据充电站状态信息 $[s_j, P_j^1(t), \dots, P_j^k(t), \dots]$ 预测出 $[T, T + \Delta t]$ 时段内每个充电站可空闲充电桩数量 C_j^{free} 和空闲桩总量 $C^{\text{free}}, C^{\text{free}} = \sum_j C_j^{\text{free}}$. 为提高预约服务质量, 在 $[T, T + \Delta t]$ 时间段对部分空闲充电桩采取预留处理. 显然, 预留空闲桩的数量影响着预约车辆和随机车辆占有充电资源的公平性.

定义预约车辆的排队等待时间 D^{res} 超出允许时间 t_0 的容忍概率^[16-17] 为

$$\Delta P(t_0) = \Pr(D^{\text{res}} > t_0) = \pi^c \exp(-(C\mu - N_1)t_0), \quad (15)$$

其中稳态概率

$$\pi^c = \frac{\pi^0 C \rho^C (\rho^{\text{res}})^{C-C_O} C_O}{C!(C_O - \rho^{\text{rad}} S(C_O, C))(C - \rho^{\text{res}})}.$$

显然,当区域截断值 C_O 确定时,稳态概率 π^c 由区域的初始概率 π^0 、服务强度 ρ 、预约服务强度 ρ^{res} 、随机服务强度 ρ^{rad} 和系数 $S(C_O, C)$ 决定,初始概率 $\pi^0 = \left(\sum_{n=0}^{C_O-1} \frac{\rho^n}{n!} + (\rho^{C-O}) S(C_O, C) / [(C_O - 1)!(C_O - \rho^{\text{rad}} S(C_O, C))] \right)^{-1}$, 服务强度 $\rho = \rho^{\text{res}} + \rho^{\text{rad}}$, 系数 $S(C_O, C) = (\rho^{\text{rad}})^{-C-O} (C_O)! \left[\sum_{i=C_O}^{C-1} \frac{(\rho^{\text{rad}})^i}{i!} + \frac{(\rho^{\text{rad}})^C C}{C!(C - \rho^{\text{rad}})} \right]$.

由式(15)可知,排队等待时间 D^{res} 不超出允许时间 t_0 的概率为 $1 - \Delta P(t_0)$, D^{res} 属于 $[t_0 - n\Delta t, t_0 - (n-1)\Delta t]$ 时间段的概率为 $\Delta P(t_0 - n\Delta t) - \Delta P(t_0 - (n-1)\Delta t)$, 排队等待时间的最小期望 $E_{\min} = \sum_n (t_0 - n\Delta t) [\Delta P(t_0 - n\Delta t) - \Delta P(t_0 - (n-1)\Delta t)]$, 最大期望为 $E_{\max} = \sum_n (t_0 - (n-1)\Delta t) [\Delta P(t_0 - n\Delta t) - \Delta P(t_0 - (n-1)\Delta t)]$, 根据最小期望 E_{\min} 和最大期望 E_{\max} 可确定出满足 $E_{\min} \geq E_0, E_{\max} \leq E_1$ 时 C_O 的取值范围, E_0 为最小排队等待时间, E_1 为最大排队等待时间.

为保证公平性,定义区域内平均排队等待时间

$$T_{\text{avg}} = \frac{D^{\text{rad}} + \varphi E_{\min}}{1 + \varphi}. \quad (16)$$

其中: $D^{\text{rad}} = \mu^{-1} \pi^0 (\rho/\rho^{\text{res}})^{C-O} (C_O)^2 [C_O - \rho^{\text{rad}} \cdot S(C_O, C)]^{-2} \left[\sum_{k=C_O}^{C-1} \frac{(\rho^{\text{res}})^k S^2(C_O)}{k!} + \frac{(\rho^{\text{res}})^C C^2}{C!(C - \rho^{\text{res}})^3} \right]$ 为区域内随机车辆的平均排队等待时间^[17]; φ 为预约车辆与随机车辆等待时间的权重系数,当 φ 确定后,在 C_O 的取值范围内选取 T_{avg} 最小值时的 C_O , 则预留桩数量 $R = C - C_O$.

2.2 预留桩的选择算法

定义预留桩选择变量

$$\omega_{jk}(t) = \begin{cases} -1, & \text{充电站 } j \text{ 内充电桩 } k \text{ 选为预留桩;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (17)$$

当充电桩 k 被选为预留桩时,定义充电站收益

$$u_{ijk} = v_i - \tau_{jk} q_{jk}. \quad (18)$$

其中: v_i 为预约车辆 i 支付的预约成本, q_{jk} 为充电站 s_j 内充电桩 k 的单位时间预留成本, τ_{jk} 为充电站 s_j

内充电桩 k 的预留时间, $\tau_{jk}^c = CT_i - T + \Delta T - t_{jk}^c, t_{jk}^c$ 为充电站 s_j 内充电桩 k 的剩余充电时间. 预留桩的选取应满足充电站收益的最大化,即

$$\omega_{jk}^* = \arg \max_{\omega_{jk}} \sum_j \sum_k \omega_{jk} (v_i - \tau_{jk} q_{jk}); \quad (19a)$$

$$\text{s.t. } \omega_{jk} \in \{0, 1\}, \quad (19b)$$

$$\sum_k \omega_{jk} \leq C_j^{\text{free}}, \quad (19c)$$

$$\sum_j \sum_k \omega_{jk} = R, \quad (19d)$$

$$v_i - \tau_{jk} q_{jk} \geq 0. \quad (19e)$$

其中:约束条件(19b)表示充电站 s_j 内空闲充电桩 k 是否可被选为预留桩,约束条件(19c)表示站内预留桩的数量不能超出空闲桩的数量,约束条件(19d)表示区域内预留桩总数为 R ,约束条件(19e)表明预留桩的收益非负. 预留桩的选取是01整数线性规划问题,利用lingo进行求解.

2.3 预约车辆与充电桩的匹配算法

通过 ω_{jk} 可知预留桩的集合 M 及充电站 s_j 内预留桩的子集 $M_j, M = \sum_j M_j$. 显然,预约请求数量 $N_1 \geq R$, 定义 R_1 为采用抢占方式接受充电服务的预约车数量, $R_1 = N_1 - R$. 定义充电站 j 中备选的闲置充电桩集合为 $M'_j, M_j \cap M'_j = \emptyset$, 时序关系如图2所示. 定义二维变量 x_{im}^j 和 $x_{im'}^j$, 分别表示预约车辆与 M_j, M'_j 集合中充电桩的匹配关系,有

$$x_{im}^j = \begin{cases} -1, & \text{预约车辆 } i \text{ 分配给 } s_j \text{ 内预留桩 } m; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (20)$$

$$x_{im'}^j = \begin{cases} -1, & \text{预约车辆 } i \text{ 分配给 } s_j \text{ 内空闲桩 } m'; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (21)$$

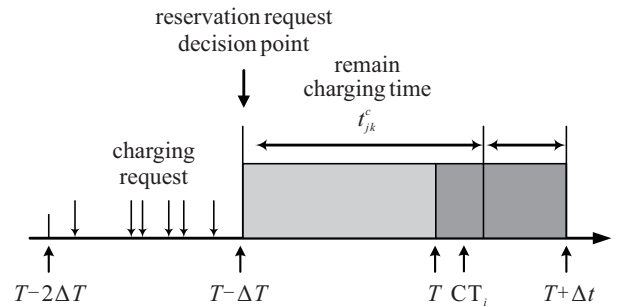


图2 可备选空闲桩的决策时间序列

定义准入控制规则保证预约车辆对预留桩的使用权,规则如下:1) 预约车辆在预约时间段到达充电站后,通过匹配的充电桩接受服务;2) 随机车辆到达

充电站后,若只存在匹配给预约车辆的空闲桩,则在充电站外排队等待,否则进入充电站,并在空闲桩处接受充电服务。

预约车辆与充电桩的匹配算法应满足预约车辆支付的预约费用、行驶成本和抢占成本最小,即

$$x_{im}^{j*}, x_{im'}^{j*} = \arg \max_{x_{im}^j, x_{im'}^j} \sum_j \left[\sum_i \sum_m x_{im}^j (v_i + t_{im}^j) + \sum_i \sum_{m'} x_{im'}^j (v_i + t_{im'}^j + \tau_{im'}^j) \right]; \quad (22a)$$

$$\text{s.t. } x_{im}^j \in \{-1, 0\}, \quad (22b)$$

$$x_{im'}^j \in \{-1, 0\}, \quad (22c)$$

$$\left| \sum_j \sum_m x_{im}^j \right| + \left| \sum_j \sum_{m'} x_{im'}^j \right| = 1, \quad (22d)$$

$$\left| \sum_i \sum_j \sum_m x_{im}^j \right| + \left| \sum_i \sum_j \sum_{m'} x_{im'}^j \right| = N_1, \quad (22e)$$

$$\left| \sum_i x_{im}^j \right| = 1, \quad (22f)$$

$$\left| \sum_i x_{im'}^j \right| \leq 1, \quad (22g)$$

$$\frac{\left| \sum_j \sum_i \left(\sum_m x_{im}^j + \sum_{m'} x_{im'}^j \right) \right|}{\mu_j^{\text{res}} C} < 1, \quad (22h)$$

$$\frac{\left| \sum_i \left(\sum_m x_{im}^j + \sum_{m'} x_{im'}^j \right) \right|}{\mu_j^{\text{res}} C_j} < 1. \quad (22i)$$

其中: t_{im} 为用户 i 到预留桩 m 的行驶成本, $t_{im'}$ 为用户 i 到可备选空闲充电桩 m' 的行驶成本, $\tau_{im'} = t_{jk}^c + T - \Delta t - CT_i$ 为用户 i 的抢占时间成本. 目标函数(22a)是预约车辆的最小总成本,式(22d)表明每辆预约车只能分配一个充电桩,(22e)保证预约请求都会被响应,(22f)表明预留桩一定被使用,(22g)表明备选充电桩可能会分配给预约车辆,(22h)、(22i)为系统稳定条件^[17]. 由于预约车辆支付的预约费用 $\sum_j \left| \left(\sum_i \sum_m x_{im}^j + \sum_i \sum_{m'} x_{im'}^j \right) \right| v_i = N_1 v_i$ 为常数,式(22a)简化为

$$x_{im}^{j*}, x_{im'}^{j*} = \arg \max_{i,j,m,m'} \sum_j \left[\sum_i \sum_m x_{im}^j t_{im}^j + \sum_i \sum_{m'} x_{im'}^j (t_{im'}^j + \tau_{im'}^j) \right], \quad (23)$$

可等效为加权二分图问题,采用KM算法^[18]求解.

3 随机车辆的调度策略

已知 $[T, T + \Delta t]$ 的预约到达率 λ_j^{res} 、预留桩数量 R_j 及截断值 C_{O_j} , $C_{O_j} = C_j - R_j$, C_j 为 s_j 中充电桩数量. 根据随机车辆选定的时间段 $[T, T + \Delta t]$ 和位置信息 $\text{Loc}_i(t)$, 确定出 $T - \Delta T$ 时子区域 r 的随机车

辆到达率 λ_r^{rad} . 调度策略通过优化各充电站的随机车辆比例,达到降低时间成本的目的.

3.1 调度策略的优化模型

假设子区域的到达率 λ_r^{rad} 满足泊松分布, $\lambda^{\text{rad}} = \sum_r \lambda_r^{\text{rad}}$, 则充电站 s_j 的到达率满足

$$\lambda_j^{\text{rad}} = \sum_r p_{rj}^{\text{rad}} \lambda_r^{\text{rad}}, \quad (24)$$

其中 p_{rj}^{rad} 为子区域 r 内随机车辆被分配给充电站 j 的比例. 根据具有截断机制的两优先级队列模型, 站内随机车辆的平均排队等待时间^[17]为

$$D_j^{\text{rad}} = \mu_j^{-1} \pi_j^0 (\rho_j / \rho_j^{\text{res}})^{C_{O_j}} (C_{O_j})^2 [C_{O_j} - \rho_j^{\text{rad}} S(C_{O_j}, C_j)]^{-2} \left[\sum_{k=C_{O_j}}^{C_j-1} \frac{S^2(C_{O_j}, C_j) (\rho_j^{\text{res}})^k}{k} + \frac{(\rho_j^{\text{res}})^{C_j} (C_j)^2}{(C_j)! (C_j - \rho_j^{\text{res}})^3} \right], \quad (25)$$

其中 $\rho_j^{\text{rad}} = \frac{\lambda_j^{\text{rad}}}{\mu_j^{\text{rad}}}$ 为充电站 j 的服务强度.

随机车辆的优化目标是保证车辆总排队等待时间成本之和最小,优化问题的数学模型为

$$p_{rj}^{\text{rad}*}, \Lambda_{rj}^{\text{rad}*} = \arg \min_{p_{rj}^{\text{rad}}, \Lambda_{rj}^{\text{rad}}} \sum_j \sum_r \frac{\Lambda_{rj}^{\text{rad}}}{t_{rj}^{\text{rad}}}; \quad (26a)$$

$$\text{s.t. } t_{rj}^{\text{rad}} + D_j^{\text{rad}} - \Lambda_{rj}^{\text{rad}} \leq 0, \quad (26b)$$

$$-p_{rj}^{\text{rad}} \leq 0, \quad (26c)$$

$$\sum_j p_{rj}^{\text{rad}} - 1 = 0, \quad (26d)$$

$$\frac{\rho_j^{\text{rad}} S(C_{O_j}, C_j)}{C_{O_j}} < 1. \quad (26e)$$

限制条件(26b)保证了从子区域 r 到充电站 j 的行使时间 t_{rj}^{rad} 与在充电站 j 的排队等待时间 D_j^{rad} 之和不能超出车辆容忍的最大时间 $\Lambda_{rj}^{\text{rad}}$, 式(26c)和(26d)给出了决策变量 p_{rj}^{rad} 的约束条件,(26e)为稳定条件.

定理1 当 ρ_j^{res} 、 C_{O_j} 、 μ_j 为已知常数时, $(D_j^{\text{rad}})^{-1}$ 是关于 p_{rj}^{rad} 的凸函数.

定义平均排队等待时间的最小值为 D_j^0 , 随机车辆的行使时间和排队等待时间满足如下关系:

$$\frac{1}{D_j^{\text{rad}}} + \frac{1}{t_{rj}^{\text{rad}}} \leq \frac{\Lambda_{rj}^{\text{rad}}}{D_j^{\text{rad}} t_{rj}^{\text{rad}}} \leq \frac{\Lambda_{rj}^{\text{rad}}}{D_j^0 t_{rj}^{\text{rad}}}. \quad (27)$$

为进一步简化计算,修改限制条件(26c)为

$$-p_{rj}^{\text{rad}} < 0. \quad (28)$$

根据式(27)和(28),目标函数(26)修改为

$$p_{rj}^{\text{rad}*}, \Lambda_{rj}^{\text{rad}*} = \arg \min_{p_{rj}^{\text{rad}}, \Lambda_{rj}^{\text{rad}}} \sum_j \sum_r \frac{\Lambda_{rj}^{\text{rad}}}{t_{rj}^{\text{rad}}}, \quad (29a)$$

$$\frac{1}{D_j^{\text{rad}}} + \frac{1}{t_{rj}^{\text{rad}}} - \frac{A_{rj}^{\text{rad}}}{D_j^0 t_{rj}^{\text{rad}}} \leq 0, \quad (29b)$$

$$-p_{rj}^{\text{rad}} < 0, \quad (29c)$$

$$\sum_j p_{rj}^{\text{rad}} - 1 = 0, \quad (29d)$$

$$\rho_j^{\text{rad}} S(C_{-O_j}, C_j) - C_{-O_j} < 0. \quad (29e)$$

在已知预约车辆和充电桩的匹配关系 x_{im}^j 和 x_{im}^j 的基础上,可求解各子域分配给各充电站的随机车辆比例 p_{rj}^{rad} .

3.2 优化算法

由于原问题(29)是凸优化问题,满足Slater条件,且原问题和对偶问题是强对偶关系,则满足KKT条件的解就是原问题和对偶问题的最优解.优化问题的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(P, \Lambda, \alpha, \beta, \gamma, \sigma) = & \sum_j \sum_r \frac{A_{rj}^{\text{rad}}}{t_{rj}^{\text{rad}}} + \sum_j \sum_r \alpha_{rj} \left(\frac{1}{D_j^{\text{rad}}} + \frac{1}{t_{rj}^{\text{rad}}} - \frac{A_{rj}^{\text{rad}}}{D_j^0 t_{rj}^{\text{rad}}} \right) + \sum_j \sum_r (-\beta_{rj} p_{rj}^{\text{rad}}) + \\ & \sum_r \gamma_r \sum_j (p_{rj}^{\text{rad}} - 1) + \\ & \sum_j \sigma_j \left[\sum_r p_{rj}^{\text{rad}} \lambda_r^{\text{rad}} S(C_{-O_j}, C_j) - \mu_j^{\text{rad}} C_{-O_j} \right], \end{aligned} \quad (30)$$

其中 α_{rj} 、 β_{rj} 、 γ_r 、 σ_j 为拉格朗日因子.基于KKT条件的不等式及等式约束如下:

$$\alpha_{rj}^* \left(\frac{1}{(D_j^{\text{rad}})^*} + \frac{1}{t_{rj}^{\text{rad}}} - \frac{(A_{rj}^{\text{rad}})^*}{D_j^0 t_{rj}^{\text{rad}}} \right) = 0, \quad (31a)$$

$$(\beta_{rj})^* (p_{rj}^{\text{rad}})^* = 0, \quad (31b)$$

$$\sum_j (p_{rj}^{\text{rad}})^* - 1 = 0, \quad (31c)$$

$$\sigma_j^* \left[(p_{rj}^{\text{rad}})^* \lambda_r^{\text{rad}} S(C_{-O_j}, C_j) - \frac{\mu_j^{\text{rad}} C_{-O_j}}{r} \right] = 0. \quad (31d)$$

显然,取最优解时拉格朗日函数 $L(P, \Lambda, \alpha, \beta, \gamma, \sigma)$ 的梯度等于0,则

$$\begin{aligned} \sum_j \sum_r \alpha_{rj}^* \left\{ \left[\frac{1}{(D_j^{\text{rad}})^*} \right] \frac{\sum_r \lambda_r^{\text{rad}}}{\mu_j} \right\} - \sum_j \sum_r \beta_{rj}^* + \\ \sum_j \sum_r \gamma_{rj}^* + \sum_j \sum_r \sigma_j^* \lambda_r^{\text{rad}} S(C_{-O_j}, C_j) = 0, \end{aligned} \quad (32a)$$

$$\sum_j \sum_r \frac{1}{t_{rj}^{\text{rad}}} - \sum_j \sum_r \alpha_{rj}^* \left(\frac{1}{D_j^0 t_{rj}^{\text{rad}}} \right) = 0. \quad (32b)$$

由式(31b)、(31d)、(32b)可知 $\beta_{rj}^* = 0, \sigma_j^* =$

$0, \alpha_{rj}^* = D_j^0$, 将 $\alpha_{rj}^* = D_j^0, \beta_{rj}^* = 0$ 和 $\sigma_j^* = 0$ 分别代入式(31a)、(32a)可得

$$(A_{rj}^{\text{rad}})^* = \frac{D_j^0 t_{rj}^{\text{rad}}}{(D_j^{\text{rad}})^*} + D_j^0, \quad (33)$$

$$\left[\frac{1}{(D_j^{\text{rad}})^*} \right] \frac{D_j^0 \sum_r \lambda_r^{\text{rad}}}{\mu_j} + \gamma_r^* = 0. \quad (34)$$

最后求解式(31c)、(33)、(34)组成的方程组即可求得最优分配率 $(p_{rj}^{\text{rad}})^*$ 和最大容忍时间 $(A_{rj}^{\text{rad}})^*$.

关于随机车辆与充电桩的匹配问题,需考虑车辆终点位置 $\text{Des}_i(t)$ 和充电桩的距离因素,使所有车辆从充电桩到终点位置的距离之和最小.

4 仿真实验与分析

实验模拟了将2个子区域内的电动汽车分配至2个充电站的场景,假设每个子区域内电动汽车数量相同,每个充电站内有10个DC快充桩,排队队列为有限长,仿真的关键参数如表1所示,其中 E_0 和 E_1 值可以根据区域的负载量进行调整,数据结果为15次随机实验的平均值.

表1 实验参数列表

变量	数值
λ^{res}	22/h ~ 34/h
λ^{rad}	16/h ~ 21/h
$\mu^{\text{res}} = \mu^{\text{rad}}$	0.33/h
$t_{11}^{\text{rad}}, t_{21}^{\text{rad}}, t_{12}^{\text{rad}}, t_{22}^{\text{rad}}$	1/12h, 2/15h, 1/6h, 1/10h
E_0, E_1	1/120h, 1/20h
φ	1, 5, 10, 15, 20
$\Delta t = \Delta T$	0.33/h

4.1 预留桩数量的选择

表2中1)~7)给出了 E_{\min} 、 E_{\max} 和 T_{avg} 与预约车辆到达率的对应关系,此实验中随机车辆到达率 λ^{rad} 均为20/h.对数据分析可知,除 $\lambda^{\text{res}} = 22/h$, $C_{-O} = 19$ 和 $\lambda^{\text{res}} = 24/h, C_{-O} = 18$ 外, E_{\min} 和 E_{\max} 取值均满足 E_0 和 E_1 的要求.在满足 E_0 和 E_1 的条件下,当 λ^{res} 确定时,随着截断值 C_{-O} 的增加,预留桩数量的减少, E_{\min} 和 E_{\max} 逐渐增大,这说明通过调整截断值可改变预约车辆的排队时间预期.进一步分析可知,当 λ^{res} 和 C_{-O} 都确定时,除 $\lambda^{\text{res}} = 22/h, C_{-O} = 20$ 外,随着权重 φ 值的增加,平均时间 T_{avg} 逐渐减小.为平衡预约车辆和随机车辆利益,所有实验均在 $\varphi = 15$ 的条件下测得.显然,预留桩的数量受预约车辆到达率的影响.到达率较小时,例如 $\lambda^{\text{res}} \leq 22/h$ 时,充电桩足以满足预约、随机车辆的需求,无需设置预留桩;当车辆到达率较大时,例如 $\lambda^{\text{res}} \geq 30/h$ 时,为避免随机车辆利益损失严重,此时也不应设置预留桩;其余情况则可通过设置预留桩优先保证预约车辆的利益.

表2 预留桩选择参数列表

1) $\lambda^{res} = 22/h$								
$C_{-}O$	R	E_{min}	E_{max}	T_{avg}				
				$\varphi = 1$	$\varphi = 5$	$\varphi = 10$	$\varphi = 15$	$\varphi = 20$
19	1	0.4	1.4	0.63	0.51	0.48	0.47	0.47
20	0	0.5	1.5	0.51	0.53	0.53	0.53	0.53

2) $\lambda^{res} = 24/h$								
$C_{-}O$	R	E_{min}	E_{max}	T_{avg}				
				$\varphi = 1$	$\varphi = 5$	$\varphi = 10$	$\varphi = 15$	$\varphi = 20$
18	2	0.4	1.4	1.40	0.77	0.63	0.58	0.55
19	1	0.5	1.5	0.94	0.67	0.61	0.58	0.57
20	0	0.6	1.6	0.74	0.66	0.65	0.64	0.64

3) $\lambda^{res} = 26/h$								
$C_{-}O$	R	E_{min}	E_{max}	T_{avg}				
				$\varphi = 1$	$\varphi = 5$	$\varphi = 10$	$\varphi = 15$	$\varphi = 20$
18	2	0.5	1.5	2.15	1.07	0.84	0.74	0.70
19	1	0.6	1.6	1.41	0.89	0.77	0.72	0.70
20	0	0.7	1.7	1.08	0.85	0.80	0.78	0.70

4) $\lambda^{res} = 28/h$								
$C_{-}O$	R	E_{min}	E_{max}	T_{avg}				
				$\varphi = 1$	$\varphi = 5$	$\varphi = 10$	$\varphi = 15$	$\varphi = 20$
18	2	0.6	1.6	3.37	1.56	1.14	0.98	0.90
19	1	0.7	1.7	2.16	1.20	0.99	0.91	0.87
20	0	0.8	1.9	1.62	1.10	0.99	0.94	0.92

5) $\lambda^{res} = 30/h$								
$C_{-}O$	R	E_{min}	E_{max}	T_{avg}				
				$\varphi = 1$	$\varphi = 5$	$\varphi = 10$	$\varphi = 15$	$\varphi = 20$
18	2	0.7	1.7	5.50	2.33	1.61	1.34	1.20
19	1	0.8	1.9	3.40	1.70	1.31	1.17	1.09
20	0	0.9	2.0	2.52	1.48	1.25	1.16	1.11

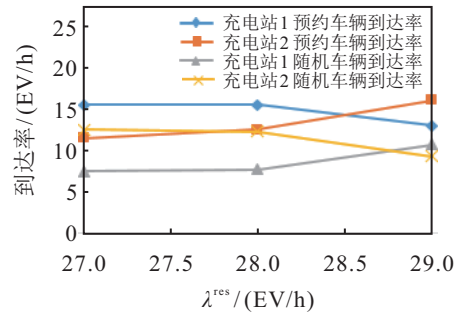
6) $\lambda^{res} = 32/h$								
$C_{-}O$	R	E_{min}	E_{max}	T_{avg}				
				$\varphi = 1$	$\varphi = 5$	$\varphi = 10$	$\varphi = 15$	$\varphi = 20$
18	2	0.8	1.9	9.63	3.79	2.46	1.96	1.70
19	1	0.9	2.0	5.59	2.50	1.81	1.54	1.41
20	0	1.0	2.1	4.04	2.07	1.63	1.46	1.37

7) $\lambda^{res} = 34/h$								
$C_{-}O$	R	E_{min}	E_{max}	T_{avg}				
				$\varphi = 1$	$\varphi = 5$	$\varphi = 10$	$\varphi = 15$	$\varphi = 20$
18	2	0.9	2.0	19.80	7.26	4.41	3.34	2.78
19	1	1.0	2.1	9.94	4.04	2.70	2.20	1.93
20	0	1.2	2.2	6.96	3.13	2.25	1.92	1.76

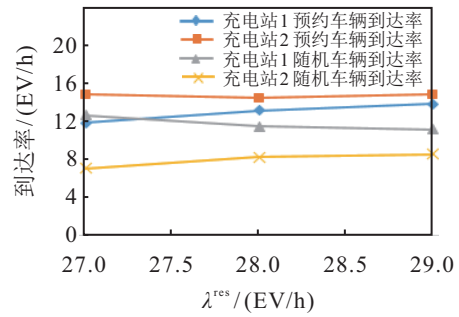
4.2 预留桩的影响分析

预留桩分别选在充电站1和充电站2时对算法CCPQ的影响如图3所示,此时 $\lambda^{rad} = 20/h$.

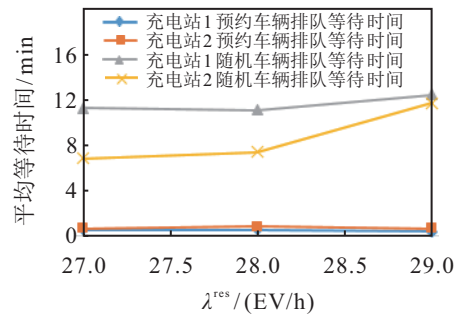
分析图3(a)和图3(b)可知,在相同的 λ^{res} 值下,充电站内预约车辆到达率与随机车辆到达率成相反的数学关系.对预约车辆分析可知,预约车辆的分配主要由空闲桩的分布决定,由于实验中预留桩数量较少,受预留桩的影响较少,而当预留桩的数量增多时,对分配比例的影响将逐渐增强.对随机车辆分析可



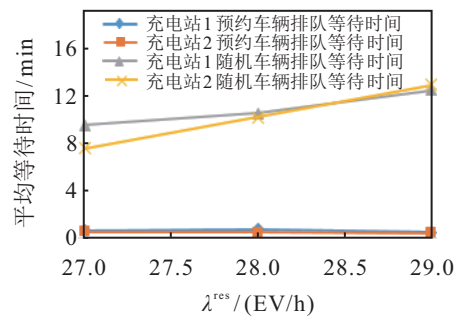
(a) 预留桩在充电站1时的到达率



(b) 预留桩在充电站2时的到达率



(c) 预留桩在充电站1时的平均排队等待时间



(d) 预留桩在充电站2时的平均排队等待时间

图3 预留桩的影响分析

知,随着 λ^{res} 的增加,预留桩所在充电站的随机车辆到达率呈上升趋势,无预留桩的充电站到达率却呈相反的趋势.这说明预留桩对随机车辆的分配有明显影响,尤其是在高到达率下.

图3(c)和3(d)给出平均排队等待时间.预约车辆的平均排队等待时间均少于1 min,并未随着 λ^{res} 和 λ^{rad} 的变化呈现明显改变.预留桩所在充电站的预约车辆的等待时间略少于另一充电站的等待时间.随机车辆排队等待时间受充电站内预约车辆和随机车辆到达率的影响较大,随着 λ^{res} 的增加,随机

车辆排队等待时间呈增长趋势。

4.3 算法的比较

图4和图5为预约车辆到达率 λ^{res} 和随机车辆到达率 λ^{rad} 对CCPQ算法与JDCO(joint delay and cost optimization)^[3]、EWT(expected waiting time)^[15]算法的影响。

在分析预约车辆到达率 λ^{res} 的影响时, $\lambda^{\text{rad}} = 20/\text{h}$ 。如图4(a)所示,CCPQ算法的预留桩可抵消增长的预约车辆到达率对预约车辆排队时间的延长作用,例如当 λ^{res} 由22/h变为24/h时;但随着到达率的增加抵消效果逐渐减弱,例如 λ^{res} 由24/h变为28/h时。进一步分析可知,不设置预留桩时,尤其是在高到达率的情况下,例如当 $\lambda^{\text{res}} \geq 30/\text{h}$ 时,预约车辆排队等待时间仍被控制在容许范围内。而EWT算法,仅为高优先级车辆设计了抢占策略,而未考虑预留桩的问题,因此在 $24/\text{h} \leq \lambda^{\text{res}} \leq 28/\text{h}$ 时,排队时间略多于CCPQ。

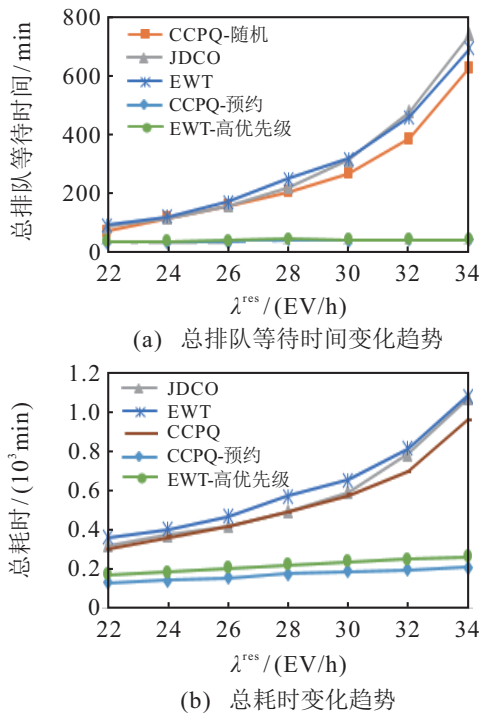


图4 总排队时间、总耗时随预约到达率的变化趋势

显然设置预留桩和抢占空闲桩损害了随机车辆利益。本实验中将JDCO算法的时间成本假定为系统可接受的总成本,并以此来衡量CCPQ算法中随机车辆成本的可接受性。当预约车辆到达率较小时,例如 $\lambda^{\text{res}} = 24/\text{h}$,虽然预约车辆的累积总时间收益无法完全抵消随机车辆的成本损失,但CCPQ算法的总排队等待时间只是略大于JDCO、EWT算法。随着 λ^{res} 的增加,预约车辆累积总时间收益相应增加,例如 $\lambda^{\text{res}} = 28/\text{h}$ 时,CCPQ算法的排队时间与JDCO算法几乎相同,且优于EWT算法。这说明,虽然CCPQ

算法较EWT存在预留桩成本,但考虑不同优先级队列间相互影响的双层优化模型CCPQ使随机车辆的排队成本明显低于EWT算法中低优先级车辆成本,且随着 λ^{res} 的增加,优势越来越明显。

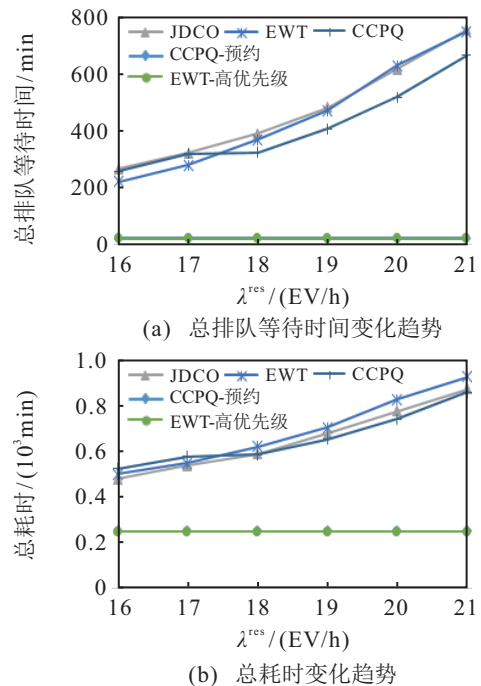


图5 总排队时间、总耗时随随机到达率的变化趋势

对图4(b)的总耗时分析可知:当设置有预留桩时,CCPQ算法由于对行驶时间的优化,总耗时与JDCO算法近似;当无预留桩时,CCPQ呈现出优于JDCO的效果。CCPQ总耗时的变化趋势说明,虽然损失了随机车辆部分利益,但对于整体而言,总时间成本并未劣于JDCO,有时效果甚至更优,这意味着成本损失是可接受的。而且CCPQ算法的总时间成本明显优于未考虑行驶时间成本的EWT算法。

随机车辆到达率 λ^{rad} 对CCPQ算法、JDCO算法和EWT算法的影响结果如图5所示,此时 $\lambda^{\text{res}} = 32/\text{h}$ 。定义 λ^{rad} 为16/h ~ 17/h时为阶段1,18/h ~ 21/h为阶段2,17/h ~ 18/h为预留桩数量 R 由1变为0的转折点。

对CCPQ的预约车辆分析可知:预约车辆排队等待时间和总耗时在阶段内是相同的,只是阶段2较阶段1略微增加;对随机车辆分析可知,在转折点处,随机车辆的总排队等待时间和总耗时没有明显的增加,这是因为预留桩的释放,增加了随机车辆可使用的空闲桩数量,抵消了增长的到达率对排队时间的延长作用,但随着到达率的增加抵消效果逐渐减弱。而JDCO算法与EWT算法的总排队等待时间和总耗时随着 λ^{rad} 的增加逐渐呈上升趋势。进一步分析可知,阶段1内CCPQ算法的排队等待时间略大于EWT算法,与JDCO算法近似,而阶段2内小于JDCO和EWT

算法. 对于总耗时而言, 虽然阶段1内CCPQ算法的时间大于JDCO和EWT算法, 但阶段2内则明显小于JDCO和EWT算法.

5 结论

本文提出了一种基于截断优先级队列的电动汽车充电调度策略, 旨在使不同等级的驾驶者享有差异化的充电时间. 将差异化的调度策略定义为双层优化模型, 在顶层, 根据高优先级车辆的最大收益设计对空闲桩的抢占算法. 该算法通过对充电桩运行情况的分析, 满足了高优先级驾驶者对充电时间的要求. 在底层, 根据最小化低优先级驾驶者的总排队等待时间成本, 设计低优先级车辆的分配策略优化算法. 该算法基于具有截止优先级的多服务排队模型, 通过对低优先级车辆的优化调度, 最大限度地减少了等待时间. 此外, 双层优化模型利用截断值实现了对不同优先级车辆利益的均衡, 避免高优先级车辆对低优先级车辆利益的过度抢占, 尽可能地保证、提高所有驾驶者的驾驶体验. 仿真结果表明, 该策略具有优越的性能.

参考文献(References)

- [1] de Cauwer C, Verbeke W, van Mierlo J, et al. A model for range estimation and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(7): 2787-2800.
- [2] 任丽娜, 路鹏伟, 刘福才. 引导电动汽车用户驾驶行为的充电导航策略[J]. *控制与决策*, 2019, 34(11): 2438-2444.
(Ren L N, Lu P W, Liu F C. Charging navigation strategy by guiding the driving behavior of electric vehicle users[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(11): 2438-2444.)
- [3] Ammous M, Belakaria S, Sorour S, et al. Joint delay and cost optimization of in-route charging for on-demand electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2020, 5(1): 149-164.
- [4] Zhang C, Liu Y A, Wu F, et al. Effective charging planning based on deep reinforcement learning for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(1): 542-554.
- [5] 李爱军, 娄莉. 考虑长期利润最大化的电动汽车充电站最优充电调度策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(7): 53-60.
(Li A J, Lou L. Optimal charging scheduling strategy for electric vehicle charging station considering long-term profit maximization[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(7): 53-60.)
- [6] Kumar K N, Sivaneasan B, So P L. Impact of priority criteria on electric vehicle charge scheduling[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2015, 1(3): 200-210.
- [7] Conway T. On the effects of a routing and reservation system on the electric vehicle public charging network[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(9): 2311-2318.
- [8] Bourass A, Cherkaoui S, Khoukhi L. Secure optimal itinerary planning for electric vehicles in the smart grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 3236-3245.
- [9] Bi X W, Tang W K S. Flow distribution for electric vehicles under nodal-centrality-based resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(4): 1309-1318.
- [10] Varshosaz F, Moazzami M, Fani B, et al. Day-ahead capacity estimation and power management of a charging station based on queuing theory[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(10): 5561-5574.
- [11] Zeballos M, Ferragut A, Paganini F. Proportional fairness for EV charging in overload[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6792-6801.
- [12] Ucer E, Kisacikoglu M C, Yuksel M, et al. An Internet-inspired proportional fair EV charging control method[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(4): 4292-4302.
- [13] Hussain, Kim H M. EV prioritization and power allocation during outages: A lexicographic method-based multiobjective optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 2474-2487.
- [14] Moradipari A, Alizadeh M. Pricing and routing mechanisms for differentiated services in an electric vehicle public charging station network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1489-1499.
- [15] Cao Y, Jiang T, Kaiwartya O, et al. Toward pre-empted EV charging recommendation through V2V-based reservation system[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(5): 3026-3039.
- [16] Said D, Mouftah H T. A novel electric vehicles charging/discharging management protocol based on queuing model[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2020, 5(1): 100-111.
- [17] Taylor I D, Templeton J G. Waiting time in a multi-server cutoff-priority queue, and its application to an urban ambulance service[J]. *Operations Research*, 1980, 28(5): 1168-1188.
- [18] Kuhn H W. The Hungarian method for the assignment problem[J]. *Naval Research Logistics*, 2005, 52(1): 7-21.

作者简介

蔡凌(1980—), 女, 讲师, 博士, 从事资源调度与优化、智慧交通系统等研究, E-mail: cailing9852@126.com;

郭戈(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事网联车辆协同控制、智能交通系统、共享出行系统优化与控制等研究, E-mail: geguo@yeah.com;

施冷安东(2001—), 男, 本科生, 从事网联车辆协同控制、智能交通系统、共享出行系统优化与控制等研究, E-mail: slad43@163.com.