

引用格式:沙玲,汪静,张海峰,等. 基于仿真方法的共享换电站价值量化分析[J]. 北京工业大学学报, 2025, 51(1): 22-31.
SHA L, WANG J, ZHANG H F, et al. Quantification analysis of shared battery swap station value based on simulation methods[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2025, 51(1): 22-31. (in Chinese)

基于仿真方法的共享换电站价值量化分析

沙玲¹, 汪静¹, 张海峰¹, 王岱²

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 上海蔚来汽车有限公司, 上海 201800)

摘要: 相较于电动汽车充电站,换电站具有补能时间短、空间面积小等优点。多品牌电动汽车高效共享换电站,能够极大程度优化补能结构,减少资源浪费。为了量化共享换电站对电动汽车用户的价值,基于排队理论,利用蔚来汽车品牌的运行数据,搭建一个模拟用户换电行为的仿真器,通过量化用户的平均排队时间和换电站数量,评估电动汽车用户在不同电动汽车规模和换电站渗透率下的换电体验。结果表明,电动汽车品牌共享换电站资源,能够显著减少电动汽车用户的排队时间,以及将排队时间保持在期望阈值内所需的换电站数量,从而提高用户的充电体验并节省换电站建设成本。

关键词: 电动汽车; 换电站; 共享; 排队论; 换电体验; 仿真

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2025)01-0022-10

doi: 10.11936/bjutxb2024050014

Quantification Analysis of Shared Battery Swap Station Value Based on Simulation Methods

SHA Ling¹, WANG Jing¹, ZHANG Haifeng¹, WANG Dai²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. NIO Company Limited, Shanghai 201800, China)

Abstract: Compared to electric vehicle charging stations, battery swapping stations have advantages such as shorter energy replenishment time and smaller spatial area. Multi-brand electric vehicle high-efficiency shared battery swapping stations can optimize the energy replenishment structure to a great extent and reduce resource waste. To quantify the value of shared battery swapping stations for electric vehicle users, based on queue theory and using the operating data of NIO car brand, a simulator was developed to simulate user's battery swapping behavior and quantify the average queuing time and the number of battery swapping stations, to evaluate the battery swapping experience of electric vehicle users under different scales of electric vehicles and penetration rates of battery swapping stations. Results show that sharing battery swapping station resources among different electric vehicle brands can significantly reduce the queuing time of electric vehicle users and the number of battery swapping stations needed to keep the queuing time within the expected threshold, thereby improving the user's charging experience and reducing the construction cost of battery swapping stations.

Key words: electric vehicle; battery swapping station; sharing; queue theory; charging experience; simulation

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62373294)

作者简介: 沙玲(1970—), 女, 副教授, 主要从事电动汽车充换电优化调度方面的研究, E-mail:01050305@sues.edu.cn

电动汽车(electric vehicle, EV)作为一种环保、高效的交通工具,具有显著的环境优势,大力发展EV对我国实现碳中和和碳达峰的“双碳目标”具有重要意义^[1]。与此同时,传统的内燃机汽车面临着环境污染、能源过度消耗等诸多挑战。各国政府采取措施限制内燃机汽车的使用^[2],鼓励出行用户使用清洁能源的交通工具。如挪威计划到2025年停止内燃机汽车的销售;英国计划到2030年停止销售内燃机汽车,到2035年停止销售混动汽车;法国计划到2040年停止销售内燃机汽车;德国则预计在2050年完全过渡到电动汽车阶段;美国加利福尼亚州也计划到2035年停止销售内燃机汽车;中国计划到2035年新能源汽车占新车销量的37.5%以上。

与传统的快速/超级充电站相比,换电站(battery swapping station, BSS)具有快速、安全、灵活以及环保的优势和潜力,对新能源汽车的发展有积极的推动作用^[3]。以色列公司Better Place于2011年3月部署了首座现代商用BSS,美国Tesla也于2013年进入换电领域。纯电动汽车的使用数量、用户的充电习惯、电价制定、换电设施的兼容性以及用户满意度等成为BSS发展面临的重大挑战^[4]。中国蔚来汽车(NIO)于2018年5月推出首座BSS,到2023年5月,NIO在中国建设了超过1400座BSS。其中,NIO推出的第三代BSS配备了21个电池组,每天可更换408块电池。国内建设BSS的知名企业还包括国家电网、奥动新能源、宁德时代、东风、第一科技、亿纬锂能、博中等^[5]。其中,长安汽车和奥动新能源公司均预计到2025年部署10000座BSS,NIO预计到2025年部署4000座BSS。

目前参与换电服务市场的EV品牌越来越多,且许多公司只支持特定类型的EV换电^[6]。考虑换电技术的持续发展和成本效益问题,吕应龙^[7]针对BSS的选址、规模和运营策略展开深入研究,旨在找到BSS的最佳位置、配置和充电/服务计划,以提高运营商的投资回报率(return on investment, ROI)和用户对换电服务的满意度。Jing等^[8]采用5个整数线性规划确定BSS的数量、位置以及规模,以达到最小化系统总投资的目的,同时追求最佳配置,包括充电设施类型和电池库存。Mak等^[9]采用二阶混合整数二次规划描述了电池库存和EV用户之间的供求关系,以最小化建设和配置BSS的成本为目标。Zhang等^[10]考虑用户的出行行为,采用通用的Bender分解算法和来自出租车车队的真实数据,提

出了一个估算BSS位置和规模的模型。高赐威等^[11]提出一个考虑社会、地理和电力系统因素的最佳BSS选址和规模的成本效益模型。用户的充电行为受日行驶里程分布、EV用户的出行习惯等因素的影响,为了更加准确地预测EV到达BSS的时间和剩余电量,许多研究借助车辆行为、行驶里程等统计数据结合Monte Carlo方法进行分析^[12-13]。此外,合理制定电价以及在BSS中合理配置电池的数量^[14]均可以有效影响用户的充电行为,进而促进电网负荷平衡,优化能源利用,降低成本,减少碳排放,推动电动汽车的普及和可持续性发展^[15-16]。卢志平等^[17]提出一个由政府、汽车制造商和换电运营商三方参与的决策博弈模型,求解出补贴政策前后各方的最优电价、适当的补贴比例以及电池配比等关键决策变量。张昌华等^[18]建立了基于车主用车习惯和电池充电管理策略的数学模型,并结合Monte Carlo模型计算电池数量、充电控制策略等因素对换电裕度的影响。Xu等^[19]和Adler等^[20]通过交通流分析和EV路径的非线性算法确定BSS中所需备用电池组数量。

EV用户在BSS中的排队时间是影响用户换电体验的重要因素^[21],在制定BSS优化策略时需要重点考虑。Tan等^[22-23]提出一种考虑竞争率和换电时间的混合排队网络模型,以阻塞概率来评估BSS的性能,同时通过对BSS系统中所需的最少电池组数量的研究,验证了相较于充电设施,用户的平均等待时间对电池的数量更为敏感。Sun等^[24]运用排队理论,考虑EV到达BSS的时间、状态和充电时间等因素,利用Monte Carlo方法模拟出最优的充电策略。但以上研究都没有考虑到不同类型的电动汽车和电池之间的服务兼容性对用户换电体验和BSS规划的影响。

为了量化共享换电资源对EV用户排队时间和BSS建设成本的价值,搭建一个仿真器对不同规模EV和BSS渗透率下的用户换电排队时间和将排队时间保持在期望阈值内所需的换电站数量进行估算。为保证仿真结果的准确性,仿真参数选取NIO的BSS位置和运行数据,并将NIO品牌下EV用户的换电模式和空间-时间分布作为输入。

1 仿真方法

为了量化多个EV品牌共享BSS对换电用户排队时间和BSS建设成本的影响,提出一个连续仿真的仿真器。该仿真器基于连续仿真方法,以适应需

要跟踪电池的荷电状态(state of charge, SOC),即当前电池电量与电池总容量的比例持续变化的要求。与基于事件的仿真侧重于事件之间的顺序和影响不同,连续仿真适用于描述系统状态在时间上的连续变化^[25],通过固定仿真时间步长运行并在每个时间步长结束时更新系统状态。

1.1 排队论模型

排队论是一个强大的计算工具,能够计算出不同场景下充电用户的排队时间,作为本文量化共享BSS收益的理论基础。排队系统的定义如下。

BSS:设置2座BSS为区域内相邻位置,每座BSS目前只服务特定类型的EV。假设每座BSS均被2种类型的EV品牌共享,站内可分别创建一个统一的队列系统,有换电需求的EV用户将考虑不同BSS中的队列长度选择特定的换电站。

EV到达:假设EV到达BSS的时间分布为泊松分布,到达率为 λ 。可通过标准的车辆交通监控技术确定。

服务时长:即换电时长(包括进入BSS停车的时间)遵循指数分布。将平均服务时长记为 D ,则单位时间内每座BSS的平均服务率为 $\mu = 1/D$ 。

换电系统模型是一个M/M/s排队系统^[26],属于经典的排队模型。该系统包括s座BSS,且各BSS工作相互独立,服务率相同。上述假设是在排队论研究中通常采用的,有助于分析和理解系统的行为。

根据排队论^[26],每座BSS的服务强度为 $\rho = \lambda/\mu$,表示换电站的繁忙程度。当 $\rho/s \leq 1$ 时,系统服务车辆数为0的概率 p_0 为

$$p_0 = \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \left(1 - \frac{\rho}{s}\right)^{-1} \right]^{-1} \quad (1)$$

期望排队长度 L_q 为

$$L_q = p_0 \frac{s\rho^{s+1}}{s! (s-\rho)^2} \quad (2)$$

站内的期望EV数量 L 为

$$L = L_q + \rho \quad (3)$$

排队系统的期望逗留时间 W 为

$$W = L/\lambda \quad (4)$$

排队系统的期望等待时间 W_q 为

$$W_q = W - 1/\mu \quad (5)$$

假设2个品牌的EV可共享2座BSS,则所定义的换电排队系统为M/M/2队列。否则,系统有2个M/M/1队列。进一步假设每座BSS每小时可以服务10辆车,且平均每小时有8辆电动汽车到达

BSS。根据式(1)~(5),可以计算这2种场景的排队关键指标。结果如表1所示。

表1 排队论的分析结果

Table 1 Analytic results of the model

场景	λ	μ	s	L	L_q	W_s	W_q
M/M/1	8.0	10.0	2.0	4.0	3.2	30.0	24.0
M/M/2	8.0	10.0	1.0	3.6	2.8	16.7	10.7

计算结果显示,共享BSS可显著提高换电服务效率。例如,2个不同品牌进行BSS共享相较于独立运行可以使所有接受服务的EV用户的平均排队时间从24.0 min减少到10.7 min。虽然这一评估是基于简化模型中的某些假设,但为BSS共享的优势提供了理论依据。下面通过基于实际数据的仿真来深入研究BSS的共享问题。

1.2 数据采集与分析

仿真对象选择覆盖城市中255个站点的大型BSS网络,利用NIO在上海的BSS网络中的真实数据,其中包括截至2023年4月12日的NIO品牌105座BSS的信息。从数据库中提取每座BSS的位置和运行数据,包括历史EV用户到达BSS的时间、开始和结束时的SOC以及其他能够反映用户出行特征的关键指标。分析上述指标的模式和分布以生成仿真的相关输入,使仿真能够有效反映真实情况。

选取NIO在上海BSS网络中的105座BSS运行数据,得到4月份BSS在一周内服务的换电EV数量的分布情况,如图1所示。多数BSS每天的服务频次集中在20~60次,但处于较繁忙地区的BSS每天的换电服务频次多达130次。此外,换电服务频次中位数为40~50次,表明BSS每天服务的换电

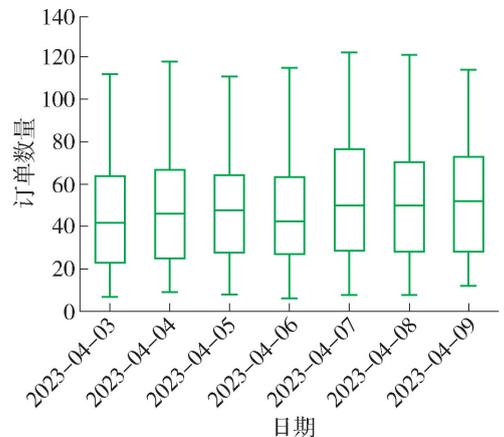


图1 2023年4月一周各站订单数分布

Fig. 1 NIO distributions of order numbers of different stations in a whole week of April, 2023

EV 数量远远低于其服务能力, BSS 的利用率存在极大的提升空间。

根据 NIO 2023 年 1 月至 4 月的运营数据可得 EV 用户每小时到达 BSS 的概率分布,如图 2 所示。例如, BSS 在凌晨 0 点到 1 点之间的服务的 EV 数量占每日总 EV 数量的 1%, 即如果一座 BSS 在一天内

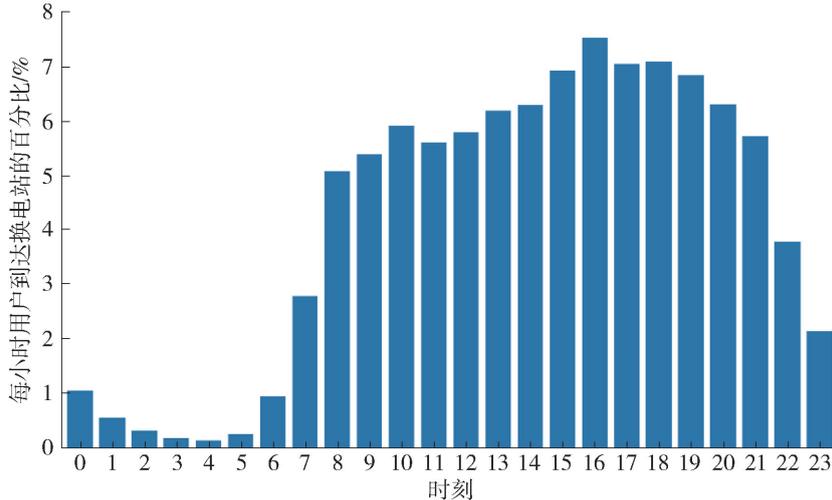


图 2 用户每小时到达的概率分布

Fig. 2 Distribution of customer arrivals in each hour

电池的初始荷电状态和最终荷电状态决定了 BSS 需要提供的负荷量和换电持续时间。通常情况下,当电池的 SOC 不低于 90% 时就可以参与换电服务^[27],故本文假设电池 SOC 达到 90% 以上才能参与换电服务。初始 SOC 的分布如图 3 所示,中位数在 18% 左右,说明 EV 用户在剩余电量接近该值时开始产生充电需求。该分布将作为仿真中 EV 到达 BSS 的初始 SOC 的输入。

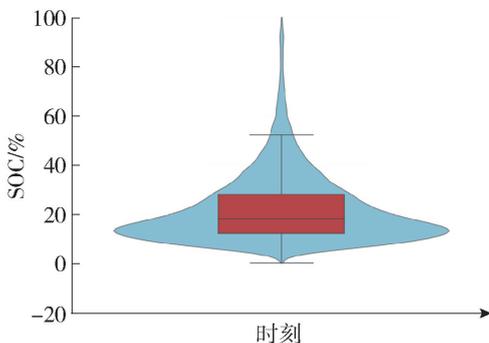


图 3 到达换电站时的 EV 剩余电量分布

Fig. 3 Distribution of battery SOC at the beginning of swapping service

1.3 仿真框架

所提仿真器的流程如图 4 所示。在整个仿真过

程中,连续仿真每辆电动汽车的不同状态(排队、交换、离开)时每座 BSS 的 EV 用户排队状态,以及 BSS 内每个电池组的 SOC。表 2 为流程图中涉及的符号及其意义。

服务 100 辆 EV,其中有 1 辆 EV 的换电行为发生在凌晨 0 点到 1 点之间。数据显示,晚上 9:00 之后 BSS 服务的 EV 数量大幅下降。高峰时段出现在下午 4 点至 5 点之间,获取该时段内 EV 用户一天到达 BSS 的时间分布对计算仿真中 EV 用户到达 BSS 的时间起着至关重要的作用。

仿真中 EV 到达 BSS 的时间遵循图 2 中的分布,每小时内的时间段是随机的。EV 到达 BSS 时的剩余 SOC 分布如图 3 所示。EV 的初始索引 $i=0$,时间的初始索引 $t=0$ 。单辆 EV 的排队时间和每座 BSS 的初始队列均为空列表。电池参与换电服务的 SOC 阈值设置为 90%,模拟时间步长设置为 1 min。

为了仿真 EV 的换电过程,对一天内每个时间步长和每辆 EV 进行迭代,通过 EV 到达换电站的时间(Arr)与当前时间(t)的关系确定 EV 的状态:

1) 如果 t 在 Arr 之前,则表明 EV 尚未到达 BSS,此时研究下一辆车。

2) 如果 $t = Arr$,表示 EV 刚刚到达 BSS。遵循选站策略将 EV 添加到相应的 BSS 的队列中。若是队列中的第一辆车,将分析该 EV 的换电过程。

3) 如果 t 在 Arr 之后,有 2 种可能。EV 可能已经完成了换电服务并离开了 BSS,或者仍然处于排队状态。如果是前者,继续研究下一辆车。如果是后者,则将剩余的服务时间减少一个时间步长。当

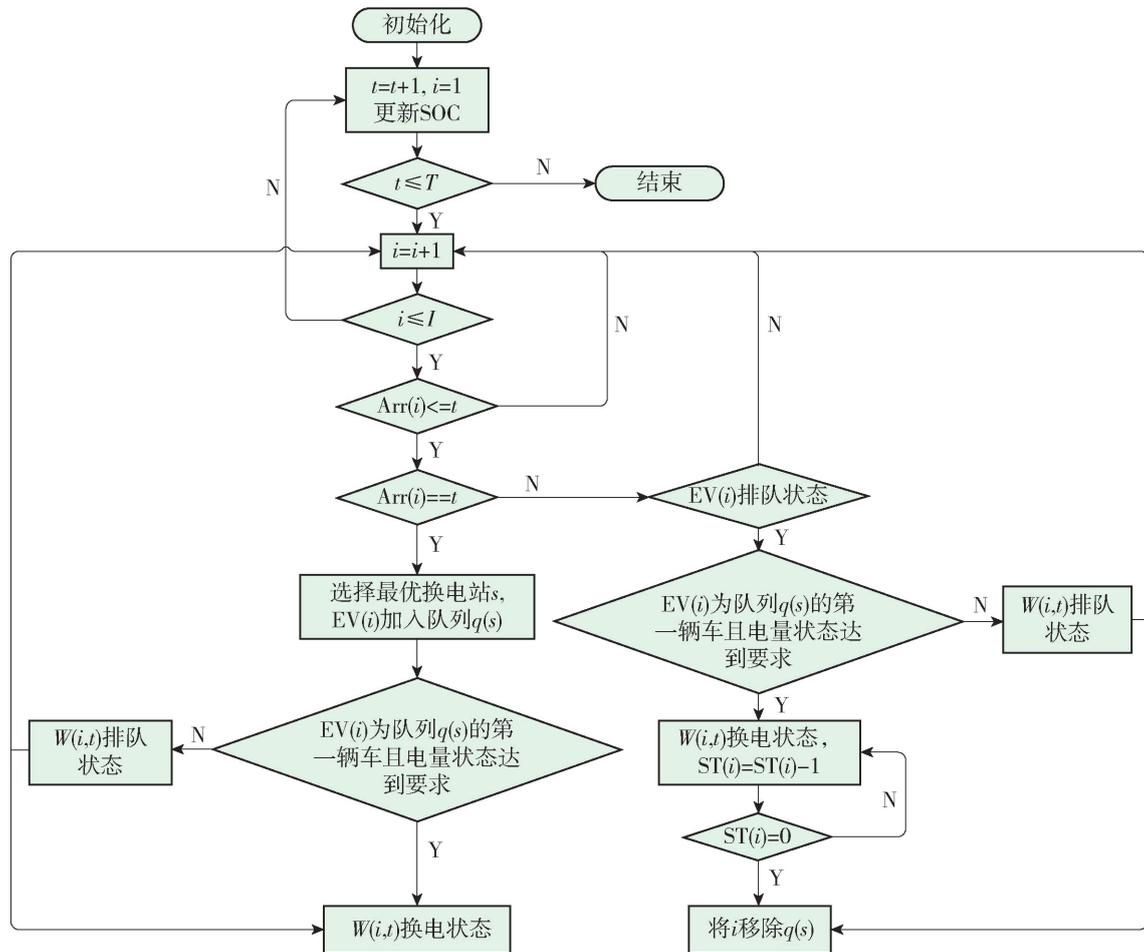


图4 仿真流程

Fig. 4 Simulation workflow

表2 仿真流程图中的参数

Table 2 Parameters in the simulation flowchart

符号	含义
Arr	车辆 i 到达换电站的时间
ST	电池换电的剩余时间
W	车辆的状态, $W \in [排队, 换电, 离开]$
i	车辆检索, $i = 1, 2, \dots, I$
q	车辆所在队列列表
s	车站检索, $s = 1, 2, \dots, S$
t	时间检索, $t = 1, 2, \dots, T$

剩余服务时间为 0 时, 将 EV 从队列中移除。

在每个时间步长结束时, 考虑每个模块的充电功率更新 BSS 中电池组的 SOC。只有当 SOC 高于阈值时才允许电池交换; 否则, 车辆必须等待。

该仿真过程的一个重点是为每辆 EV 选择进行换电服务的 BSS。该过程要考虑 3 个方面, 首先,

BSS 必须位于 EV 行驶的目标区域内; 其次, BSS 必须配置有换电 EV 所需的电池类型, 在 BSS 共享模式下, 假设电池组是通用的; 最后, 根据队列长度和 BSS 中电池组的状态计算排队等待时间, 从而将车辆分配给所有可用 BSS 中等待时间最短的。

2 仿真结果

所提仿真器使用软件 Python3.9.12 从零开始开发, 通过仿真 EV 用户的换电过程, 获取 EV 用户的排队时间, 以评估不同场景下 BSS 的建设成本和 EV 用户的换电体验。仿真基于 NIO 二代站, 站内可以容纳 13 个电池组, 每个充电模块具有 40 kW 的功率容量, 假设电池容量为 75 kW·h。

许多因素都会影响排队时间, 例如 EV 和 BSS 的数量、可用的电池组、充电功率、电池尺寸、换电服务时间等。为了进行敏感度分析, 本文将其中几个影响因素作为确定值, 针对单一品牌的 BSS 系统进行研究, 分析 BSS 数量、EV 数量和服务时间对用户

排队时间的影响。仿真时引入一个变量,即“EV与BSS的数量比率”,表示平均每座BSS可以服务的EV数量,在本文中使用 Ψ 表示。BSS的数量从10到100不等,步长为10,而 Ψ 的范围从200到1000不等,步长为100。图5(a)和(b)分别表示EV换电服务时长为5 min和6 min时,用户的排队时间随BSS和EV数量的变化有所改变。随着 Ψ 的增加,BSS每天服务的EV数量越多,用户的排队时间越长,且用户的排队时间随 Ψ 的增加并不是线性的。例如,在图5(b)中,当有100座BSS,且 $\Psi > 600$ 时,用户的排队时间急剧增加。从成本效益的角度来看,在达到这个转折点之前限制 Ψ 是明智的。

当固定 Ψ 时,排队时间随着BSS数量的增加而增加。例如,在图5(a)中,当 $\Psi = 800$,且有100座BSS时,用户的排队时间为8 min;而当 $\Psi = 800$,有90座BSS时,用户的排队时间为5 min。这种增长

主要是因为服务的换电EV数量的不平衡随着BSS数量的增加而变得更加明显。假设BSS最初建在繁忙地区,然后往空闲地区扩展,随着BSS和EV数量的增加,繁忙的BSS可能需要服务更多的EV进行换电,导致BSS服务EV数量的不平衡。BSS建设初期允许较大的 Ψ 值,不会显著增加用户的排队时间。随着EV数量的增加,需要更多的BSS来抵消换电服务负荷失衡的影响。

对比图5(a)和(b)可知,随着换电服务时间的减少,用户的排队时间显著减少。在服务时间为5 min的情况下,100座BSS可以支持70000辆EV,且用户的排队时间小于5 min;而在服务时间为6 min的情况下,只能支持60000辆车。该情况下建议换电服务提供商减少服务持续时间,以提高BSS的使用效率。搭建的仿真器中将换电服务时间设置为6 min。

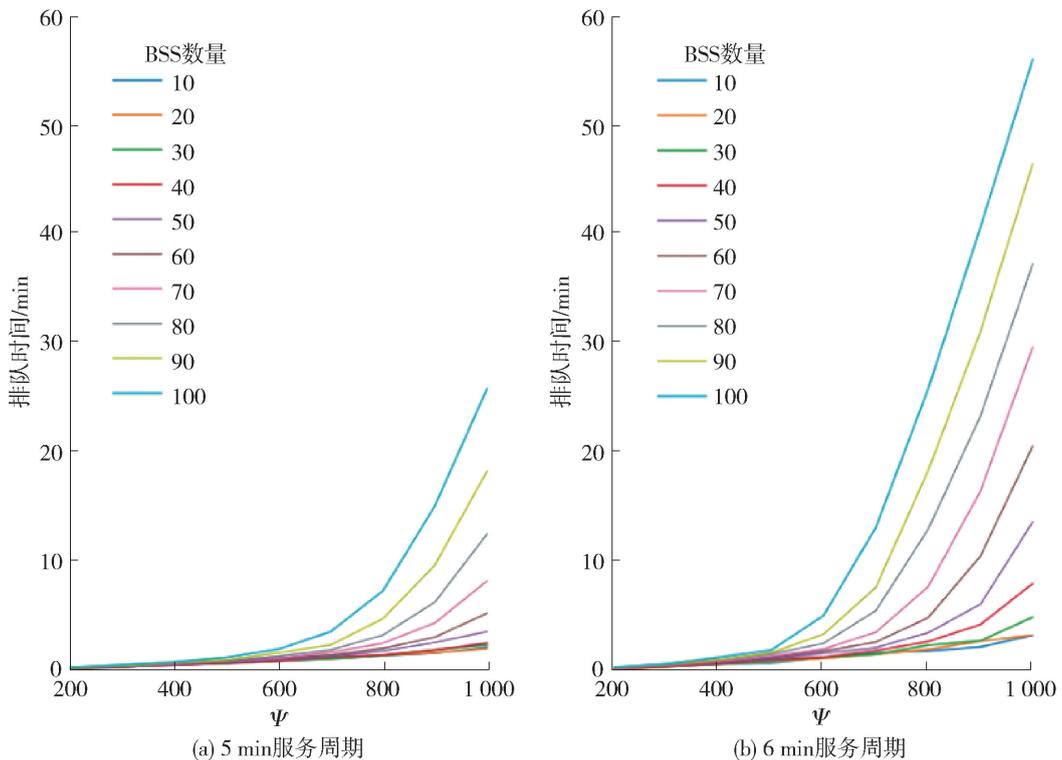


图5 不同车站数目及 Ψ 下的排队时间

Fig. 5 Queuing time with different numbers of BSSs and Ψ

下文中以“共享”模式表示EV品牌共享换电站,“不共享”模式表示EV品牌均独立运营的情况。分析“共享”模式和“不共享”模式下,随着BSS数量和EV数量的变化,用户平均排队时间的动态变化。在“照常营业”(business as usual, BAU)的情况下,2个品牌在“不共享”模式下,限制每个品牌的EV只能在指定的BSS进行换电。在“共享”模式下,假设

2个品牌的EV均可以进入目标区域内的任何一座BSS。考虑到2个EV品牌可能处于不同的发展阶段,给出下面2种换电场景。

场景1:该场景下,X品牌已经成立了好几年,拥有稳定的EV市场和BSS数量,而Y品牌刚刚进入新能源市场,且处于建设BSS的初期。本文进一步探索Y品牌在不同发展阶段,两EV品牌EV用户

的平均排队时间在“共享”模式和“不共享”模式下的变化情况,从而量化共享 BSS 对处于稳定发展阶段的 EV 品牌和新兴 EV 品牌用户平均排队时间的影响。

场景 2: X 品牌和 Y 品牌的 BSS 和 EV 数量相近,且数量同步增加。分析该场景下将用户排队时间控制在特定阈值内所需要的 BSS 数量。以此评估相同排队时间下,共享 BSS 对换电资源利用率的影响,阐明通过 BSS 共享在不同场景中实现效率提高和资源优化的优势。

在场景 1 中假设 X 品牌在城市中运营 100 座 BSS,总共服务 80 000 辆 EV ($\Psi = 800$)。Y 品牌的 BSS 从 10 座增加到 100 座,以 10 座为单位递增, Ψ 的值以 100 为单位从 100 增加到 1 000。根据仿真计算结果,对应所需要 Y 品牌的 BSS 数量分别为 10、50、80、100 座,如图 6 所示。实线表示“共享”模式下的用户平均排队时间,虚线表示 BSS 在

“不共享”模式下的用户平均排队时间。由于 X 品牌下的 EV 和 BSS 数量保持不变,因此在“不共享”模式下,X 品牌 EV 用户的平均排队时间固定为 20 min。

如图 6(a)所示,当品牌 Y 建设 10 座 BSS 时,两品牌在“共享”模式下能够显著减少品牌 X 用户的平均排队时间。同时,Y 品牌的平均排队时间略有增加。在图 6(a)和(b)中,2 条实线基本保持在 2 条虚线之间,这表明,虽然共享 BSS 在减少品牌 X 用户的平均排队时间的同时增加了品牌 Y 用户的平均排队时间,但是整体系统的效率仍然是有所提升的。

随着品牌 Y 的 BSS 数量的增加,图 6(c)和(d)中突出显示的部分,实线与虚线的位置关系表明“共享”模式下 2 个品牌用户的平均排队时间相较于“不共享”模式均有所减少。此时,共享 BSS 对 2 个品牌都是有利的。然而,随着 Y 品牌车辆的持续

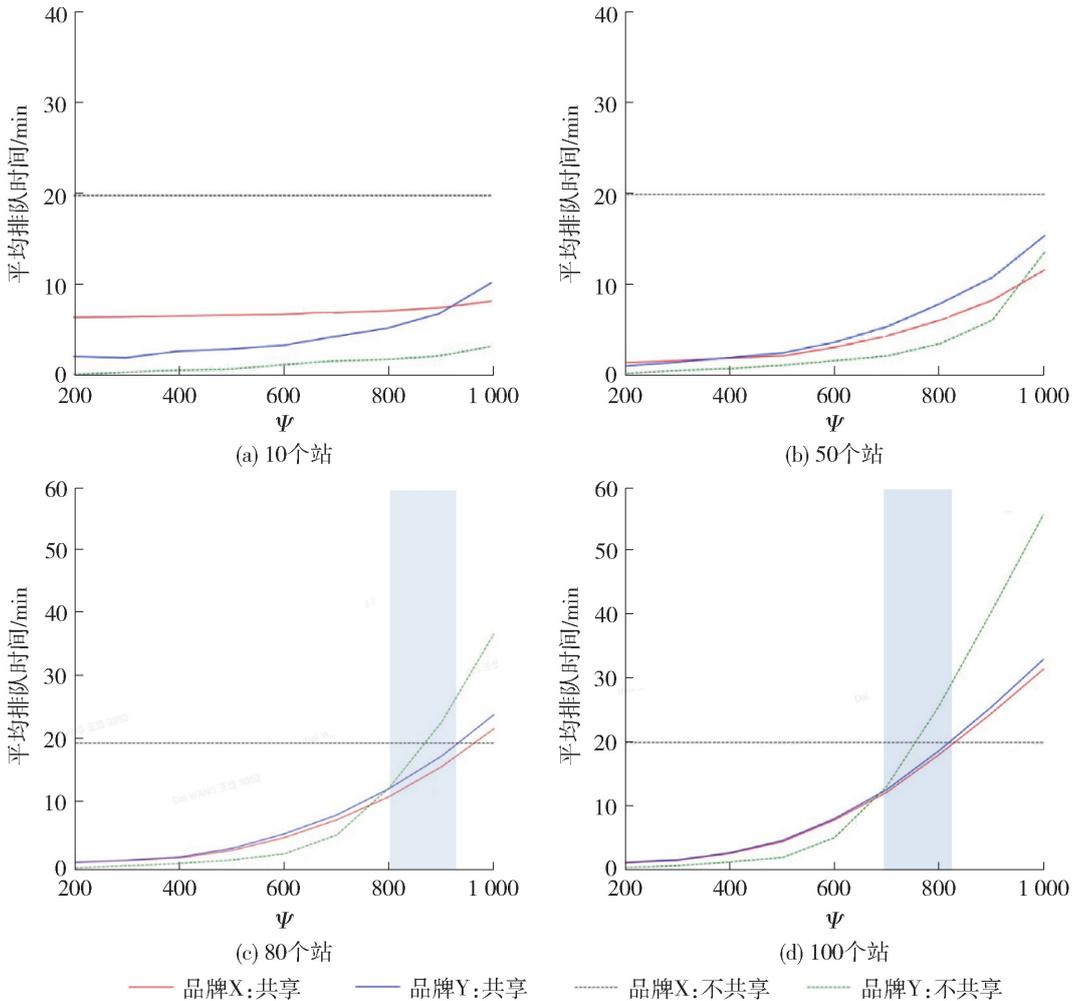


图 6 Y 品牌用户的平均排队时间在不同 Ψ 下的变化

Fig. 6 Variation in average queue time for users of Brand Y at different station proportions

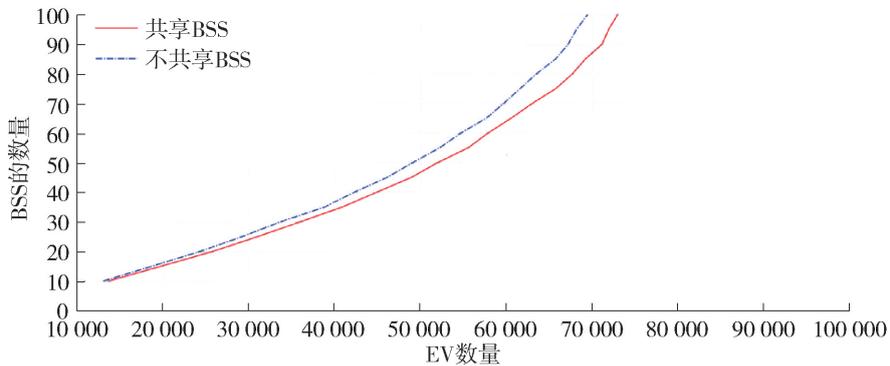
增长,由于 Y 品牌消耗了 X 品牌的换电资源,“共享”模式下 X 品牌用户的平均排队时间超过了“不共享”模式。对于换电资源紧张的品牌,在图中突出显示阶段寻求与其他品牌的资源共享能够有效减少用户排队时间,提升用户的换电体验。

场景 2 中针对不同的控制目标进行模拟,分析平均值、中位数和 95 位值,以确定服务特定数量的 EV 换电时所需的最小 BSS 数量。其中平均值和中位数表示多数 EV 用户的换电体验,而 95 位值表示有最坏换电体验的用户比例。

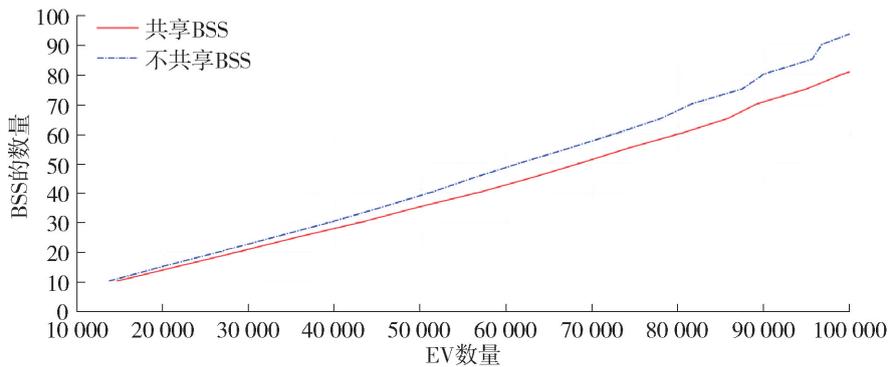
如图 7(a) 所示,维持用户平均排队时间为 10 min 所需的 BSS 数量与 EV 数量之间呈非线性关系。随着车辆数量的增加,需要更多的 BSS,主

要是由于 EV 之间的服务负载不平衡。“共享”模式下显著减少了所需 BSS 的数量。例如,当服务 60 000 辆 EV,并将用户的平均排队时间限制在 10 min 时,“不共享”模式下需要 70 座 BSS。“共享”模式下每个品牌需要建设 63 座,减少 10% 的 BSS 数量。

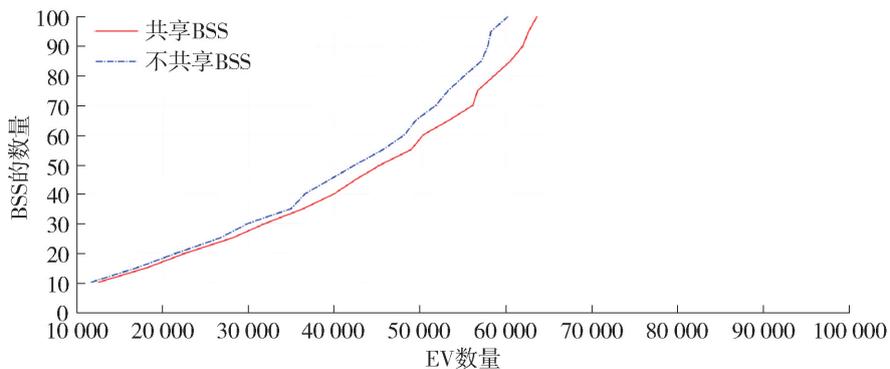
从运营方的角度,应该重点关注换电体验最差的 EV 用户。图 7(c) 展示了将 P95 状态用户的排队时间维持在 20 min 内所需的最少 BSS 数量。“不共享”模式下,当 EV 数量达到 60 000 辆时,每个品牌必须建设 100 座 BSS。在“共享”模式下,只需要建设 83 座 BSS,即“共享”模式下能够节省 17 座 BSS 的建设和运营成本。



(a) 控制目标: 平均排队时间<10 min



(b) 控制目标: 中位排队时间<8 min



(c) 控制目标: 95位排队时间<20 min

图 7 实现不同控制目标的最小 BSS 数量

Fig. 7 Minimum number of BSSs to achieve different control targets

3 结论

本文对 BSS 系统下 EV 用户的排队时间进行了研究。对 NIO 汽车品牌下 BSS 的实际位置和运行数据进行分析,以相关统计数据趋势为依据生成相关仿真参数,以此开发了一个连续的仿真器来量化各种场景下的用户排队时间,探索不同品牌之间共享 BSS 的收益和成本,得出以下结论:

1) 换电服务时长是影响换电用户平均排队时间的关键因素之一。合理设置换电服务时长能够有效提高换电服务效率,提升用户换电满意度。

2) 共享 BSS 可以减少不同 EV 品牌用户的平均排队时间,并有助于减少将用户排队时间保持在期望阈值内所需的 BSS 数量。

多个电动汽车品牌之间共享 BSS 资源可以减少用户换电排队时间,显著提升客户体验,同时能够提升 BSS 的利用率,减少建设成本。此外,共享实践的成功实施需要标准化协议、电池组尺寸,以及制造商和服务提供商之间的充分合作以应对服务负载不平衡、电池组互换性以及服务兼容性对客户体验影响等挑战,继而推动电动汽车充电基础设施的持续改进和提高客户满意度。

参考文献:

- [1] 李萌, 黄钰典, 杨睿哲, 等. 面向绿色低碳的工业互联网: 发展与挑战 [J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(11): 1251-1262.
LI M, HUANG Y D, YANG R Z, et al. Industrial Internet for green and low carbon: developments and challenges [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2023, 49(11): 1251-1262. (in Chinese)
- [2] BURCH I, GILCHRIST J. Survey of global activity to phase out internal combustion engine vehicles [R/OL]. [2024-05-16]. <https://theclimatecenter.org/wp-content/uploads/2018/09/Survey-on-Global-Activities-to-Phase-Out-ICE-Vehicles-FINAL.pdf>.
- [3] QI W, ZHANG Y L, ZHANG N W. Scaling up electric-vehicle battery swapping services in cities: a joint location and repairable-inventory model [J]. Management Science, 2023, 69(11): 6855-6875.
- [4] WU H. A survey of battery swapping stations for electric vehicles: operation modes and decision scenarios [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 10163-10185.
- [5] 艾瑞咨询. 中国新能源汽车换电市场研究报告 [R/OL]. [2024-05-16]. <https://report.iresearch.cn/report/202205/3991.shtml>.

- [6] AHMAD F, SAAD ALAM M, SAAD ALSAIDAN I, et al. Battery swapping station for electric vehicles: opportunities and challenges [J]. IET Smart Grid, 2020, 3(3): 280-286.
- [7] 吕应龙. 基于遗传算法的电动公交车换电站选址模型 [J]. 电工技术, 2022(11): 40-44, 47.
LÜ Y L. Location model of electric bus swap station based on genetic algorithm [J]. Electric Engineering, 2022(11): 40-44, 47. (in Chinese)
- [8] JING W T, KIM I, AN K. The uncapacitated battery swapping facility location problem with localized charging system serving electric bus fleet [J]. Transportation Research Procedia, 2018, 34: 227-234.
- [9] MAK H Y, RONG Y, SHEN Z J M. Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping [J]. Management Science, 2013, 59(7): 1557-1575.
- [10] ZHANG N W, ZHANG Y L, RAN L, et al. Robust location and sizing of electric vehicle battery swapping stations considering users' choice behaviors [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105561.
- [11] 高赐威, 吴茜, 薛飞, 等. 换电模式下电动汽车电池组需求规划 [J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1783-1791.
GAO C W, WU X, XUE F, et al. Demand planning of electric vehicle battery pack under battery swapping mode [J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1783-1791. (in Chinese)
- [12] ZHANG L J, LOU S H, WU Y W, et al. Optimal scheduling of electric vehicle battery swap station based on time-of-use pricing [C] // 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. New York: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [13] YAN J, MENGHWAR M, ASGHAR E, et al. Real-time energy management for a smart-community microgrid with battery swapping and renewables [J]. Applied Energy, 2019, 238: 180-194.
- [14] WANG L H, PEDRAM M. QoS guaranteed online management of battery swapping station under dynamic energy pricing [J]. IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 2019, 4(3): 259-264.
- [15] MEHRJERDI H. Resilience oriented vehicle-to-home operation based on battery swapping mechanism [J]. Energy, 2021, 218: 119528.
- [16] BATTAPOTHULA G, YAMMANI C, MAHESWARAPU S. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicle batteries in battery swapping station [C/OL] // 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe

- [2024-05-18]. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905586.
- [17] 卢志平,姚逸飞,刘婷,等.换电站建设补贴对新能源汽车换电模式的影响:基于供应链决策视角[J].供应链管理,2022,3(9):64-82.
- LU Z P, YAO Y F, LIU T, et al. The impact of subsidies for the construction of swap stations on the battery swapping model of the new energy vehicle: from the perspective of supply chain decision-making [J]. Supply Chain Management, 2022, 3(9): 64-82. (in Chinese)
- [18] 张昌华,孟劲松,曹永兴,等.换电模式下电动汽车换电充裕度模型及仿真研究[J].电网技术,2012,36(9):15-19.
- ZHANG C H, MENG J S, CAO Y X, et al. A battery swapping requirement adequacy model for electric vehicles and its simulation research [J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 15-19. (in Chinese)
- [19] XU M, MENG Q, LIU K. Network user equilibrium problems for the mixed battery electric vehicles and gasoline vehicles subject to battery swapping stations and road grade constraints [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 99: 138-166.
- [20] ADLER J D, MIRCHANDANI P B. Online routing and battery reservations for electric vehicles with swappable batteries [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 70: 285-302.
- [21] YAN R, WANG D, WANG X. A V2G charging and discharging control strategy for EVs based on the demands of the grid and users[C]//2023 International Conference on Power System Technology (PowerCon). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1-4.
- [22] TAN X Q, SUN B, WU Y, et al. Asymptotic performance evaluation of battery swapping and charging station for electric vehicles [J]. Performance Evaluation, 2018, 119: 43-57.
- [23] TAN X Q, SUN B, TSANG D H K. Queueing network models for electric vehicle charging station with battery swapping [C/OL]//2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications[2024-05-18]. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2014.7007613.
- [24] SUN B, TAN X Q, TSANG D H K. Optimal charging operation of battery swapping and charging stations with QoS guarantee [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4689-4701.
- [25] ÖZGÜN O, BARLAS Y. Discrete vs. continuous simulation: when does it matter[C/OL]//Proceedings of the 27th international conference of the system dynamics society. [2024-05-16]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=d830b724fd0d16af3dc2281e4f2017b4056fbc38>.
- [26] BHAT U N. An introduction to queueing theory: modeling and analysis in applications [M]. Boston: Birkhäuser, 2008.
- [27] 黄正伟,鲍奕辰,刘璐.基于非合作博弈的EV换电站容量优化配置与削峰方法研究[J/OL].现代电力[2024-10-28]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0083>.
- HUANG Z W, BAO Y C, LIU L. Research on optimal capacity allocation and peak shaving method of EV battery-swap stations based on non-cooperative game[J]. Modern Electric Power[2024-10-28]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0083>.

(责任编辑 张蕾)