

基于多主体建模城市私家车换电站运行策略优化研究

涂 闯^{1,2}, 谢雨含¹, 王 晶^{1,2,*}

1. 燕山大学 经济管理学院, 秦皇岛 066000;

2. 燕山大学 深圳研究院, 深圳 518063



摘 要 : 随着电动汽车规模化发展及光伏能源应用水平提升, 电池更换技术作为缓解电动汽车车主“行程焦虑”的关键技术, 可满足电动私家车快速补充电力需求。考虑到换电站的高效运营和资源优化配置是未来换电站发展面临的关键问题, 本文提出嵌套式多主体协同的仿真框架, 构建“用户-换电站-电网-光伏系统”四维交互模型。通过分钟级的动态仿真量化分析不同策略组合对系统运行效率的影响机理, 并提出最优换电站运行策略和设置配置方案。基于北京市私家车出行数据, 进行换电站运行、建设数量情景和关键参数模拟。结果表明, “即耗即充”配合光伏能源协同的运行策略, 对电网压力最小; 电池容量设置 50kWh 时换电技术实施最为经济, 汽车数量与城市总电池备用数量、总充电贝数量、换电站数量的最小配比为 5 : 1、10 : 1、5000 : 1 时可满足车辆的电力需求。

关 键 词 : 电动汽车; 换电站; 运行策略; 多主体建模

中图分类号 : F605 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 2097-4981(2025)03-0438-18

DOI: 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2025-0010

Research on Operation Strategy Optimization of Urban Private Car Changing Power Station based on Multi-Agent Modeling

TU Chuang^{1,2}, XIE Yuhan¹, WANG Jing^{1,2,*}

1. School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China;

2. Shenzhen Research Institute, Yanshan University, Shenzhen 518063, China

Abstract : With the large-scale development of electric vehicles and the improvement of photovoltaic energy application levels, battery swapping technology, as a key technology to alleviate the 'Range Anxiety' of electric vehicle owners, can meet the rapid power replenishment needs of private electric vehicles. Considering the efficient operation and resource optimization allocation of battery swap stations is a key issue for the future development of battery swap stations, this paper proposes a nested multi-agent collaborative simulation framework and builds a four-dimensional interaction model of "users-battery swapping stations-power grid-photovoltaic system". Through minute-level dynamic simulation, the influence mechanism of different strategy combinations on the system operation efficiency is quantitatively analyzed, and the optimal operation strategy and setting configuration plan of battery swap stations are proposed. Based on the private car travel data of Beijing, the operation and construction quantity scenarios of battery swap stations and key parameter simulations are conducted. The results show that the

收稿日期: 2025-03-05; **接受日期:** 2025-03-24

基金项目: 河北省高等学校人文社会科学研究青年拔尖人才项目 (BJS2024044)

作者介绍: 涂 闯 (1989—), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 研究方向为能源系统建模与仿真。E-mail: tu_chuang@sina.com

通讯作者: 王 晶 (1978—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为大数据与智能决策。E-mail: wangjing@ysu.edu.cn

“use and charge immediately” operation strategy in coordination with photovoltaic energy has the least impact on the power grid; when the battery capacity is set at 50kWh, the battery swapping technology is the most economical to implement. The minimum ratio of the number of vehicles to the total number of battery reserves in the city, the total number of charging batteries, and the number of battery swap stations is 5 : 1, 10 : 1 and 5000 : 1 respectively, which can meet the power demand of vehicles.

Key Words : electric vehicles; battery swapping station; operation strategy; multi-agent modeling

0 引言

在全球能源结构转型与“双碳”目标驱动下,汽车电气化发展已成为城市交通低碳化的重要路径^[1]。世界各国开始从电动汽车供、需两侧促进电动汽车的购买和使用^[2],预计到2040年,电动汽车在全球汽车市场的份额将达到35%^[3]。虽然电动汽车在交通领域具有巨大的减排潜力,但是电动汽车充电速度慢和充电设施不足等原因抑制了电动汽车的普及^[4]。相较于传统充电模式,换电技术凭借3~5min的快速补能效率、错峰充电的电网协同潜力以及电池集中管理的安全可控性,被公认是破解“行程焦虑”和“充电拥堵”难题的革新性解决方案^[5],同时还可以通过统一的充电计划管理降低电网负载压力。目前,电动公交车和出租车已经开始支持可更换电池^[6]。然而,城市换电站(Battery Swapping Station, BSS)系统作为涉及用户行为、电力供应、设施布局的多维复杂系统,其运营效率受制于动态需求与静态资源配置的时空错配、分布式可再生能源接入的调度协同困境以及规模化推广中的边际成本三大核心矛盾的约束^[5]。因此有必要对城市换电站的运行策略和关键参数配置进行探究。

1 文献综述

目前电动汽车换电站已引起国内外学者的广泛关注,主要集中在通过优化换电站位置规划^[7]、基础设施布局^[8]和运营策略^[9]3个方面实现收益最大化^[10]。Jamian等^[11]从电网压力最小视角出发,构建了换电站位置优化模型。由于使用光伏发电系统有助于降低碳排放量^[12],Jordehi等^[13]以Tesla 3电动汽车换电站的服务作为实验案例,考虑了换电站使用光伏和风电的运营模式,对并网发电机组资源和换电站进行了优化调度研究。Mahoor等^[14]通过对一个换电站运

营情况进行仿真,确定换电站日运行成本最低的运营模式。Wu等^[8]以换电站的备用电池库存水平最大化和平均充电损坏最小化构建了换电站基础设施优化模型,并以公交系统为例进行模拟仿真对模型进行了验证。Liang等^[10]基于北京市出租车数据,运用系统动力学研究了换电站不同运营策略、每个换电站配备不同充电贝数量、备用电池数量等基础设施数据对电力消耗和经济效益的影响,结果表明在用电低谷时进行充电可降低碳排放量,但是需要更多的备用电池。在研究方法上,目前研究主要侧重于单主体优化范式,聚焦于换电站选址或电池调度等单一环节的静态优化^[15-16],例如基于排队论的服务能力分析^[17]或基于经济性目标的充放电策略设计^[18],然而,此类方法难以刻画用户行为、换电站、电网、光伏系统间的动态交互关系。而多主体建模(Multi-Agent Modeling, MAM)因其具有对复杂系统动态性与自组织性的解析能力,既可以在微观上模拟车辆能耗行为,又能在宏观上观察总体能源消费,该方法最适用于汽车使用模拟的仿真应用^[19]。MAM的核心思想为将系统分解为多个具有独立属性、行为规则和目标的主体,每个主体能够根据环境信息和其他主体的行为进行自主决策,并通过局部交互实现全局系统的协同演化^[20]。近年来,该方法在电力系统研究中展现出独特价值。如张硕等^[21]基于多主体行为模型进行了电力市场仿真系统的构建与开发,提出了智能主体层次行为模型和仿真关键技术,完整模拟了多元主体驱动电力系统演化的动态过程。刘熙媛等^[22]探究了基于多范式建模与仿真理论的电动汽车充换电站运营系统建模方法,构建了考虑多类型电动汽车和充换电设施的仿真模型。林湘宁等^[23]则通过设计基于移动式储能车的电池时空共享模型,提出了一种分层优化调度策略,旨在解决配电网、社区和充换电站之间的能量最优交换与信息安全问题。虽然目前运用MAM探究换电站运行机制

的研究较为深入，但仍存在以下不足：

（1）时间粒度粗糙

现有模型多基于小时级或日级数据，难以捕捉分钟级需求波动对电池库存的动态影响。在电力系统运行中，电力负荷的瞬态波动既受气象突变（如短时强降水、阵性大风）也受社会活动事件（如大型场馆启停）等外源波动影响，此类波动具有非平稳性和快速时变特征。相较于传统的小时级或日级预测，运用分钟级预测可以更精准地捕捉上述瞬态波动，减少预测的误差和滞后，降低电网因预留大量备用容量而产生的成本。

（2）主体间交互简化

现有研究通常将用户行为视为外生变量，忽略其与换电站设施、光伏发电系统等要素以及各个要素之间的实时耦合关系。

（3）情景适应性不足

传统参数固化模型无法应对换电汽车更换电池需求的高度随机性及区域差异性，亟需更加完善的动态交互模型对换电汽车用户的换电行为以及换电站、电网和光伏发电系统之间的交互进行模拟并调整换电站运行策略。

针对上述问题，本文提出基于MAM的仿真优化框架，对城市私家车最优运行策略和设施配置进行探究。主要研究内容包括：①构建“用户-换电站-电网-光伏系统”四维交互模型，突破传统单主体优化范式；②引入分钟级动态仿真机制，刻画换电需求规律；③以北京市私家车出行大数据为基准，通过参数化情景仿真揭示不同策略组合的系统响应规律，最终提出换电站最优运行方案。

2 换电站运行系统概念框架

本研究的重点为在电动汽车换电技术应用情景下，从系统视角分析车辆出行行为，探究各类换电站的供电方式、关键硬件设施指标和数量配置、电池充电模式等换电站关键运行策略变动引发城市内所有换电私家车（Battery Swapping Electric Vehicle, BSEV）电力总瞬时消费量变化的影响机制，寻求对电网负荷冲击最小的换电站运行策略。为此，将城市私家车换电站运行系统定义为：在城市行政边界

内，以满足该城市居民BSEV出行电力需求为核心目标，该市所有BSEV（能源需求主体）、换电站（能源加工主体）、电网（能源供给主体）以及三者因能源流动产生的交互关系构成的有机整体，系统框架如图1所示。

图中虚线边框为城市行政边界。在城市边界内部，下方实线方框内表示各类车辆的出行链，表征在该城市属地内所有换电汽车的出行需求，其跨越了城市边界，表示车辆的出行区域不局限于城市内部，也考虑了驶出该城市边界的情况。当车辆电力低于一定水平时进入相应的换电站进行电池更换。图1中心位置的换电站，能够为需要更换电池的汽车提供电池，当车辆换电完成后离开换电站；换电站上方为能源供给主体，主要包括电网和光伏发电，能够为换电站电池充电提供电力。本研究考虑了换电站运行是否配备光伏发电和可向电网逆向输电的情况，故此，每个换电站可配备一套光伏发电系统，且电网与换电站间的电力流动是双向交互关系。

3 城市换电系统多主体行为模型构建

3.1 换电汽车主体模型构建

换电汽车能源消耗类型为电力，且来自换电站。当电池电量低于一定水平时，车辆去换电站更换充满电的电池。本研究设定，BSEV只能去换电站更换电池，不能在充电桩上进行充电。

3.1.1 换电汽车主体属性设计

换电汽车主体是城市换电站运行系统的最终能源消费主体，其属性影响了车辆的行为变化，进而影响换电站的运行效率，最终造成城市电网的电力消费峰值变动。例如，车辆的每公里电耗的差异会影响该车辆进入换电站的时间、频次、作业行为等，进而造成电网电力消耗的波动。换电汽车主体关键属性如表1所示。

3.1.2 换电汽车主体行为模型

本节对车辆的行为及其与换电站的交互关系进行分析，并建立车辆主体的数学模型，车辆行为流程如图2所示。

（1）主体属性初始化

基于14类车型占比数据，按照其相应比例确定

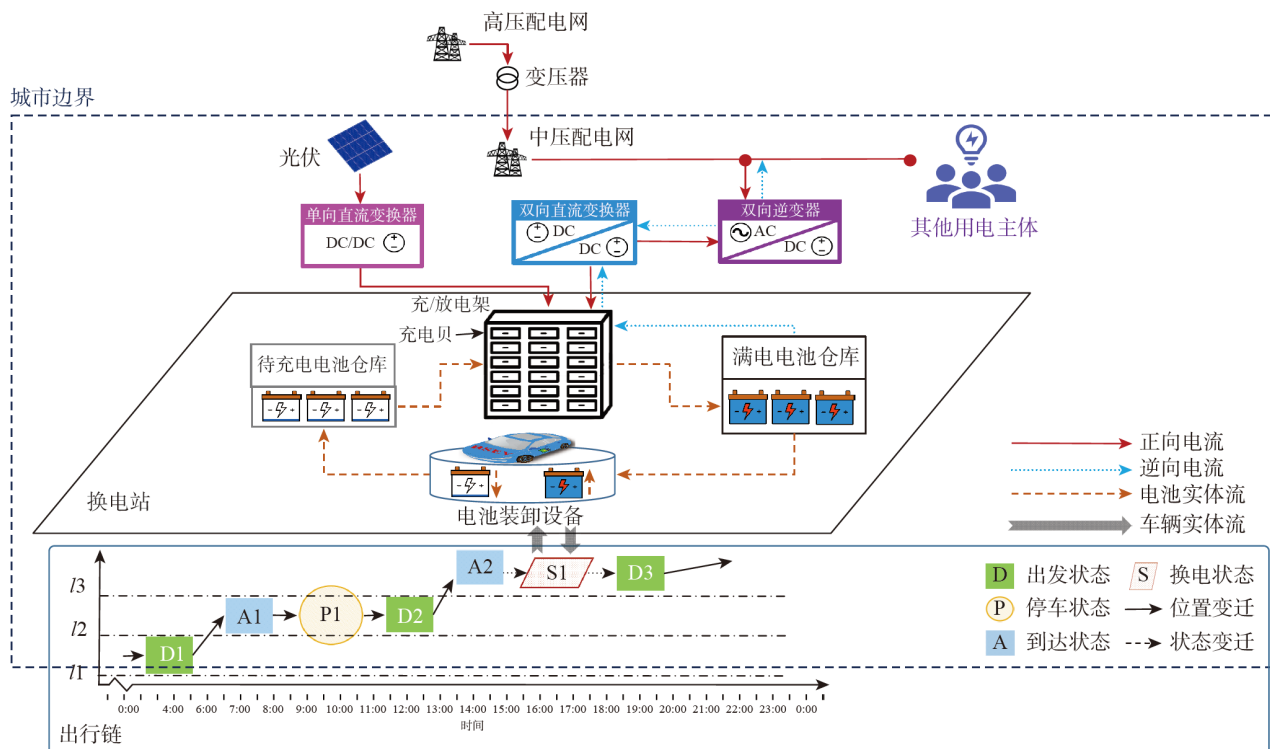


图1 城市私家车换电站运行系统框架

Fig.1 Framework of urban private vehicle battery swapping station operational system

表1 换电汽车主体关键属性

Table 1 The key attributes of the agent of the BSEV

属性名称	变量名	解释说明
车辆类型	s	车辆类型数值基于汽车制造商对车辆等级的分类划分。 $s=1 \sim 14$ 分别代表：微型车、小型轿车、紧凑型轿车、中型轿车、大中型轿车、大型轿车、小型SUV、紧凑型SUV、中型SUV、大中型SUV、全尺寸SUV、紧凑MPV、大中型MPV、跑车14个车型
车系类型	b	车系类型是指某个车辆品牌下的其中一款车系类型（例如，2023年北京市纯电动中型轿车共有21个车系，则 $b=1 \sim 21$ ， $b=1$ 代表“北汽绅宝EV”车系）。则， $i^{s,b}=1$ 代表 s 车辆类型 b 车系下的编号为1的车辆主体
每公里电耗	$ec_{p_i^{s,b}}$	当车系类型确定后，基于车辆参数数据即可知其每公里电力消耗量，单位：kWh/km
电池容量	C	实际情况是纯电动汽车每个车系电池容量存在一定差异，研究对象为换电汽车，设定其电池容量相同。电池容量值基于现有实际车辆电池容量数据为参考，后续设定不同数值进行仿真，确定最佳电池容量，单位：kWh
车主家庭位置	$home_{i^{s,b}}$	车辆主体所在家庭位置，即车辆初始化时所在具体的经纬度坐标，其数值基于城市人口核密度分布随机产生

其所属类型 (s)；按照同样办法确定其车系类型 (b)；当车辆类型和车系类型确定后，即可知其每公里电力消耗量 ($ec_{p_i^{s,b}}$)；最后基于城市人口核密度函数，确定该车辆主体的家庭位置。

(2) 判断车辆是否出行

车辆在工作日（周一～周五）和周末受到车辆限号、车主出行需求不同等因素的影响，出行率存

在差异，为此车辆是否出行需分别讨论，依据式 (1) 进行判断。 $isTP_{i^{s,b}}(d)$ 表示车辆是否在 d 日出行， $r(i^{s,b})$ 为在 $(0,1)$ 区间产生的随机数， $TP_{isworkday}$ 为出行率， $isworkday$ 为 $(0,1)$ 变量，分别为周末和工作日，其与时间 t 的转换函数见式 (2)。本研究以1min为最小时间单位。但是车辆的出行链是按照日计算的，因此需要建立时间转换函数，见式 (3)。

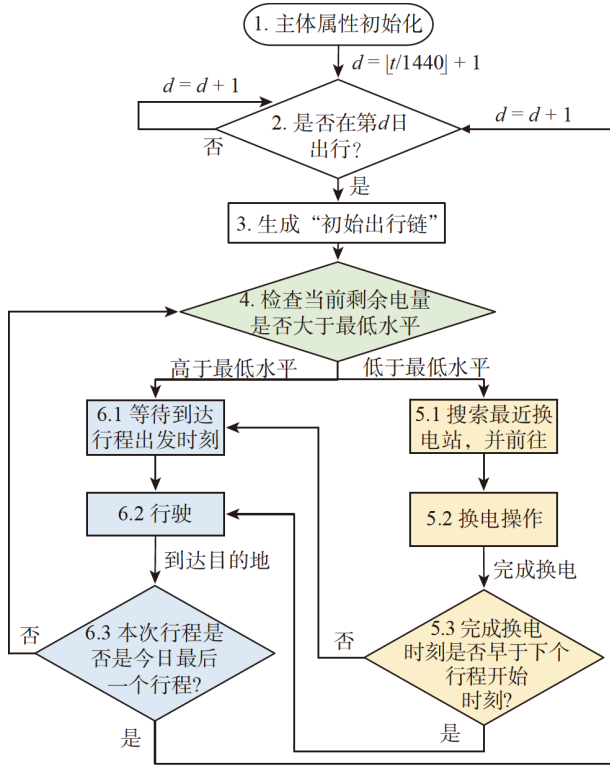


图2 BSEV 行为流程

Fig.2 Flowchart of the behavior of BSEV

其中, d 为日期编号, 取值为 1, 2, 3, ...; t 为以 min 为单位的的时间变量, 用当前时间 t 除以 1440 并向下取整, 得到当前仿真日期。

$$\begin{cases} isTP_{i^s,b}(d) = 1 & (r(i^{s,b}) \leq TP_{isworkday}) \\ isTP_{i^s,b}(d) = 0 & (r(i^{s,b}) > TP_{isworkday}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} isworkday = 0 \\ \left(d - \left\lfloor \frac{d}{6} \right\rfloor - 1 + \left\lfloor \frac{d}{6} \right\rfloor \times 6 \right) = 0 \cup d - \left\lfloor \frac{d}{7} \right\rfloor \times 7 = 0 \\ isworkday = 1 \\ \left(d - \left\lfloor \frac{d}{6} \right\rfloor - 1 + \left\lfloor \frac{d}{6} \right\rfloor \times 6 \right) \neq 0 \cap d - \left\lfloor \frac{d}{7} \right\rfloor \times 7 \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \text{检查: } \left(SOC_{i^s,b}(t) \geq \min_{SOC} \cap SOC_{i^s,b}(t) \geq \frac{l_{i^s,b}(d,n) \times ec_p_{i^s,b}}{C} \times (1+a) \right) \\ \text{换电: } \left(SOC_{i^s,b}(t) < \min_{SOC} \cup SOC_{i^s,b}(t) < \frac{l_{i^s,b}(d,n) \times ec_p_{i^s,b}}{C} \times (1+a) \right) \end{cases} \quad (5)$$

(5) 换电行为

确定换电后, 车辆驶往换电站主体, 该段行程

$$d = \left\lfloor \frac{t}{1440} \right\rfloor + 1 \quad (3)$$

(3) 生成初始出行链

出行链指一天内车辆所有行程的集合, 包括每个行程的出发地、到达地、出发时间、到达时间, 被认为是描述多出行活动特征的有效工具, 如式 (4) 所示^[24]。DT、AT、L、DL、AL 分别为在 d 日内所有行程的出发时间、到达时间、行程距离、出发地点、到达地点的集合。 dt_n 、 at_n 、 l_n 、 dl_n 、 al_n 分别为一天内第 n 次行程的出发时间、到达时间、行程距离、出发地点、到达地点, n 为车辆一天内的第 n 次行程, $n \in NT_d$ (NT_d 为车辆在第 d 天内的总行程数)。初始行程链中各参数基于实际数据的概率分布产生, 不考虑车辆因电力不足去电站更换电池的情况, 可视为车主的出行计划。后续会根据车辆电池实时情况, 改变车辆的出行行为, 造成行程变动, 故称之为初始出行链。

$$(DT, AT, L, DL, AL)_d = (dt_1, \dots, dt_n; at_1, \dots, at_n; l_1, \dots, l_n; dl_1, \dots, dl_n; al_1, \dots, al_n)_d \quad (4)$$

(4) 检查车辆当前电池状态行为

车主在出发前检查当前电池电量状态 (剩余电量与电池容量的比值, State of Charge, SOC)。若当前电量低于电池最低水平或本次电力需求则选择距离车辆当前位置最近的换电站进行电池更换, 即步骤 (5); 否则开始本次行程, 即步骤 (6)。式 (5) 为判断公式, $l_{i^s,b}(d,n)$ 为车辆在 d 日第 n 个行程的出行距离。 $\min_{SOC}$ 为因为行程焦虑或驾驶习惯等因素, 车主去换电站的最低电池状态。 a 为车辆行程焦虑系数, 表示为缓解车主的行程焦虑, 车主在满足本次行程所需电量的基础上的额外预留电量。由于每位车主的心理状态存在差异, 所以 $\min_{SOC}$ 和 a 非固定值, 设定 $a \sim u(10\%, 25\%)$, $\min_{SOC} \sim u(20\%, 30\%)$ ^[25]。

与车辆行驶行为一致, 并纳入初始出行链。当汽车到达换电站后, 在换电站内完成换电操作。换电后

车辆SOC值与新更换电池主体的SOC值一致，换电站内电池主体行为在之后的换电站主体行为模型部分将被详细介绍。换电时间为3~5min^[26]。当车辆换电完成后，若换电站返回原位置的总时间小于原出行链下一行程的出发时间，车辆将返回原位置并等待到下一行程的出发时刻；若完成换电时刻晚于原出行链下一个行程的出发时刻，则调整下一个行程的出发时刻为换电完成时刻。

(6) 行驶行为

当到达车辆主体某个行程的出发时刻时，车辆开始行驶，其SOC状态变化如式(6)所示。 dt_n^d 为车辆在 d 日第 n 个行程的出发时刻。 $v_{i^{s,b}}(t)$ 为车辆在 t 时刻的行驶速度，单位为km/h。当车辆到达目的地后检查是否为最后一个行程，若是，今天行程完成，等待仿真时间到达明天，返回到步骤(2)，否则回到步骤(4)。

$$SOC_{i^{s,b}}(t) = SOC_{i^{s,b}}(dt_n^d) - \int_{dt_n^d}^t \frac{v_{i^{s,b}}(t) \times ec - p_{i^{s,b}}}{C} dt \quad (6)$$

3.2 换电站主体行为模型

由于换电站有大量的电池库存，故可以将每一个换电站视为一个稳定的电力存储系统，能够以稳定的功率向电网反向输送电能，特别是在用电高峰

时，在一定程度上能够起到调峰的作用。

3.2.1 换电站主体属性设计

一个换电站主要有5个核心部分组成：换电装置、充电装置、满电电池仓库、待充电电池库和电力管理装置。换电装置是当车辆到达换电站后，将车辆上电池卸下，重新装入换电站内的满电电池的机械设施。所以，每个换电站需配备一定数量的备用电池，以提供换电服务。此外，由于电池被更换，随之会引发其各个环节属性发生变动，为便于建模，将电池主体视为换电站的子主体；充电装置是充电站为待充电电池充电的设备，每个充电站有一个或多个充电架，每个充电架有多个充电贝、一个充电贝在同一时间只可为一个电池充电；满电电池仓库和待充电电池仓库分别存储满电电池和待充电电池；电量管理装置管理换电站的电力来源和日常运行，电力来源于充电网或光伏。换电站主体关键属性如表2所示。

3.2.2 换电站主体行为模型

由于换电技术在私家车领域尚未得到推广，没有形成标准的运营模式。根据电池充电方式、充电时间管理、电力来源等差异设定了10种运营模式，具体见表3(实心表示采取相应充电措施，空心点表示不采取)。每种运行模式行为存在一定差异，下文将分别讨论。

表2 换电站主体关键属性

Table 2 The key attributes of the agent of the BSS

属性名称	变量名	解释说明
换电站位置	L_{BSS}	换电站在城市边界内的经纬度
充电贝总数	NCB	换电站内充电贝数量，一个充电贝可为一个电池充电
满电电池数量	nfb	换电站内备用满电电池数量
待充电电池数量	nrb	换电站内待充电电池数量
总电池数量	NB	换电站内包含满电电池和待充电电池的总数量
充电贝是否进行充电操作	CB_W	充电贝充电行为属性，1为进行，0为闲置状态
充电贝输出功率	CB_P	充电贝给电池充电时的输出功率，为20kW ^[27]
充电贝充电效率	CB_E	每个充电贝给电池充电的效率，参照当前慢充电桩充电效率，取值为0.88
充电贝放电功率	CB_DP	每个充电贝向电网放电的输出功率，为20kW ^[27]
充电贝放电能效率	CB_DE	每个充电贝向电网逆向输出电量的效率，为0.93 ^[28]
待充电状态电池主体	$B_{state}^{s,i}$	换电站 s 在 $state$ 类状态下的第 i 个电池主体； s 为城市内换电站的编码； i 为待充电状态池内电池主体的编码； $state$ 为换电站内电池主体的状态属性，分为：待充电状态(RD)、满电状态(F)、放置在充电贝中状态(ICB)、正在充电状态(CI)、放电状态(DCI)。数值为1和0分别表示是否处于所在状态。如， $B_{RD}^{s,i}(t)=1$ 表示换电站 s 内在 t 时刻的待充电状态池内的第 i 个电池主体

表3 换电站运行模型

Table 3 Operation modes of the BSS

运行模式	即刻充电	集中充电	低谷充电	峰值放电	装备光伏
M1	●	○	○	○	○
M2	○	●	○	○	○
M3	●	○	●	○	○
M4	●	○	○	●	○
M5	●	○	●	●	○
M6	●	○	○	○	●
M7	○	●	○	○	●
M8	●	○	●	○	●
M9	●	○	○	●	●
M10	●	○	●	●	●

(1) M1模式

只要换电站内有待充电电池，且有空闲的充电贝，就立即进行充电操作。图3为M1模式下的换电站主体行为流程图，其具体行为如下：

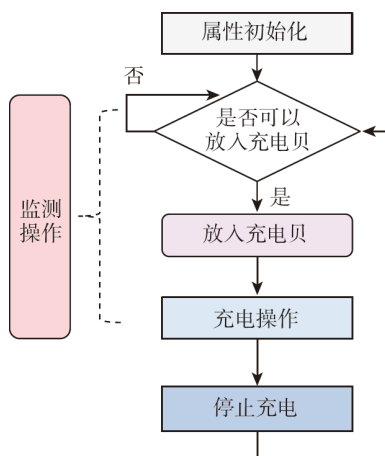


图3 M1模式下换电站行为流程

Fig.3 Flowchart of the BSS behavior in M1

1) 属性参数初始化。参考表2对换电站主体及其电池子主体的相关参数进行初始化。考虑到城市换电站实施标准化建设，设定城市所有换电站的设备标准是相同的，即除换电站位置属性不一致外，所有换电站的备用电池数量、充电贝输出功率、效率等参数均相同。

2) 监测操作。指在单位时间内统计换电站当前时刻满电电池的数量、待充电电池数量、放置在充电贝中电池的数量、在充电贝中正在充电的电池数

量和换电站中空闲充电贝的数量的实时数据。由于换电站行为会根据它的各子电池主体的状态的变动而改变，所以换电站每个行为都要伴随监测操作。设定最小仿真时间单位执行一次监测操作，即1min执行一次监测操作。

3) 将电池放入充电贝。当换电站内有待充电电池且充电架中有空闲的充电贝，则将电池放入空闲的充电贝，如式(7)所示。 $cw^s(t)$ 表示充电贝是否可以放入电池，等于1为可以，等于0为不可以； $nrb^s(t)$ 表示换电站 s 在 t 时刻现存待充电电池的数量； ncb_{idle}^s 为换电站 s 在 t 时刻空闲充电贝的数量。

$$\begin{cases} cw^s(t) = 1 & (nrb^s(t) > 0 \cap ncb_{idle}^s(t) > 0) \\ cw^s(t) = 0 & (nrb^s(t) = 0 \cup ncb_{idle}^s(t) = 0) \end{cases} \quad (7)$$

对于换电站而言，将电池放入充电贝或换电汽车进入换电站完成换电操作后，换电站中各电池主体的数量和状态均会发生变化，其变动规则如下：

当将待充电电池主体放入充电贝，各状态下的电池主体变化规则为：如果换电站中待充电电池的数量大于空闲充电贝的数量时，则在待充电电池群体中选择编码 $i = 1 \sim ncb_{idle}^s(t)$ 的电池主体放入充电贝中。被选中的待充电电池主体状态变量从电量耗尽状态转变为放置充电贝中状态，并更新各状态池内电池主体的编码。如果换电站中待充电电池的数量小于空闲充电贝的数量时，则将全部的待充电电池主体放置在充电贝中，并更新各状态池内电池主体的编码。

当汽车进入换电站完成电池更换，各状态下的电池主体变化规则为：当车辆完成换电操作后，原有换电站内待充电电池群体中将会新增一个从车中换下的电池主体 $B_{RB}^{s,i=nrb^s(t_0)+1} = 1$ ，其他状态变量值为0；同时，还需在换电站满电电池群体中选择编号为1的电池主体安装在车辆上，该车辆的电池状态变为该满电电池主体的电池状态，即 $SOC_{i,s,b}(t) = B_F^{s,1} SOC$ ， $B_F^{s,1} SOC$ 为换电站 s 中满电电池状态池内编号为1的电池主体SOC。换电站满电电池群体的数量将会减少一个，并更新其内的电池主体编码。

4) 充电操作。通过监测操作计算所有充电贝中空闲充电贝的数量，即充电贝中放入待充电电池后，

若空闲充电贝的数量小于换电站中充电贝的总数量, 则开始进行充电操作, 如式(8)所示, $CB_{working}^s(t)$ 为换电站 s 的充电贝在 t 时刻是否开启充电状态。执行充电任务的充电贝中一旦有电池电量充满 ($SOC \geq u(0.9, 0.95)^{[29]}$), 则从充电贝中将该电池取出并放入满电电池仓库, 电池主体电量变动情况如式(9)所示, $B_{IC_SOC}^{s,i}(t)$ 为正在充电电池主体 i 在 t 时刻的SOC, $B_{IC_SOC}^{s,i}(t_0)$ 为电池主体 i 在开始充电前的电池SOC。M1模式下换电站的电力来自于电网, 其充电时瞬时电力消耗见式(10)。

$$\begin{cases} CB_{working}^s(t) = 1 & (ncb_{idle}^s(t) < NCB) \\ CB_{working}^s(t) = 0 & (ncb_{idle}^s(t) = NCB) \end{cases} \quad (8)$$

$$B_{IC_SOC}^{s,i}(t) = B_{IC_SOC}^{s,i}(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{CB_P \times CB_E}{C \times 60} dt \quad (9)$$

$$BSS_{ec}^s(t) = \frac{CB_P \times \sum_i B_{CI}^{s,i}}{60} \quad (10)$$

其中, $BSS_{ec}^s(t)$ 为换电站 s 在 t 时刻每分钟的电力消耗量, 因此除以60。

5) 关闭充电工作。当换电站中所有的充电贝均空闲时, 表示换电站内已经没有待充电电池, 则关闭充电架的充电操作。

(2) M2模式

为集中充电模式, 当换电站内待充电电池数量大于或等于换电站充电贝的总量时, 将与充电贝总数量相等的待充电电池放入充电贝中进行集中充电操作。所以与M1的差异在于步骤3, 需要将式(7)的约束条件调整为式(11)的形式。

$$\begin{cases} cw^s(t) = 1 & (nrb^s(t) > NCB \cap ncb_{idle}^s(t) = 0) \\ cw^s(t) = 0 & (nrb^s(t) = 0 \cup ncb_{idle}^s(t) = 0) \end{cases} \quad (11)$$

当充电贝中所有电池均完成充电时, 则停止充电操作。当待充电电池的数量大于等于充电贝总数量时, 再进行下一轮的充电操作。由于放入充电贝的待充电电池的剩余电量存在差异, 所以每个充电贝完成充电的时间存在差异, 在充电贝中充电的电池数量会发生动态变化。

(3) M3模式

只有在城市用电低谷时段, 换电站可对待充电

电池进行充电。其工作模式与M1相同, 只是限制了充电开始时间。所以与M1的差别在于步骤4中充电贝开启充电行为的约束条件由式(8)转变为式(12)的形式, s_t 、 e_t 分别为用电低谷的开始时间和结束时间。一天内有多个用电低谷期。当用电低谷时段结束或充电贝内所有电池完成充电, 则停止换电站电池充电操作。若当用电低谷时段结束, 充电贝中仍有未完成充电的电池, 同样停止充电, 并将该充电贝中的电池视为待充电电池, 这些电池的SOC为停止充电时刻的SOC。

$$\begin{cases} CB_{working}^s(t) = 1 \\ (ncb_{idle}^s(t) < NCB \cap t \in [s_t, e_t]) \\ CB_{working}^s(t) = 0 \\ (NCB = NCB \cup t \notin [s_t, e_t]) \end{cases} \quad (12)$$

(4) M4模式

该模式为即刻充电模式, 可在用电峰谷区间向电网放电, 即在M1模式的基础上增加向电网逆向输电的功能。图4为M4模式下的换电站主体行为流程图, 其具体行为如下:

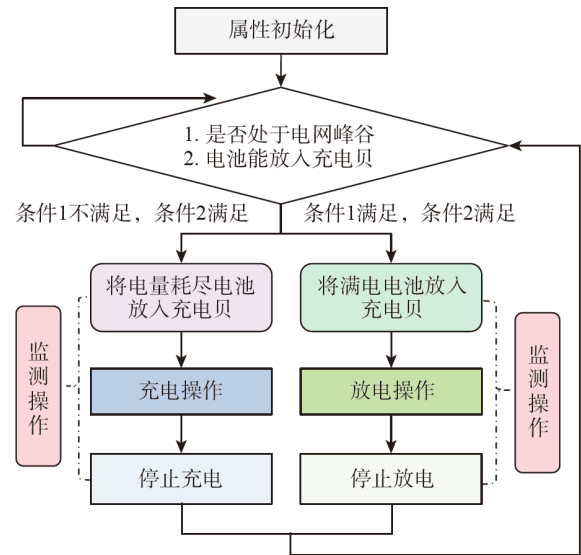


图4 M4模式下换电站行为流程

Fig.4 Flowchart of the BSS behavior in M4

1) 属性参数初始化。在M1模式属性参数初始化的基础上, 针对电池主体增加一个放电状态的变量 ($B_{DCI}^{s,i}$), 用以描述该电池主体是否处于向电网方向放电状态, 过程同M1。

2) 监测操作。与M1的监测操作相同。

3) 将电池放入充电贝。该步骤与M1的差异在于：若当前时间处于用电高峰时段，则需要将满电的电池放入充电贝，用于向电网反向输电；若不处于用电高峰时段，且满足M1模式下式(7)中的 $cw^s(t)=1$ 的条件，则与M1操作一致，执行将电量耗尽电池放入充电贝的操作；若当前处于用电高峰期，但换电站内满电电池的数量小于换电站内充电贝的数量，则既不进行充电也不进行放电操作，以保障放电稳定；当换电站内满电电池数量大于换电贝总数量，且处于用电高峰期时，则可以将满电电池放入充电贝，即式(13)中 $cdc^s(t)=1$ 时刻，表示充电贝可以执行放电行为操作。 s_p 、 e_p 分别表示用电峰谷的开始时刻和结束时刻。若当前充电贝内有未完成充电的电池，则需将电池全部取出并归为待充电电池群，这些电池的SOC值为停止充电时刻的SOC值。

$$\begin{cases} cdc^s(t)=1 \left(nfb^s(t) \geq NCB \cap t \in [s_p, e_p] \right) \\ cdc^s(t)=0 \left(nfb^s(t) < NCB \cup t \notin [s_p, e_p] \right) \end{cases} \quad (13)$$

4) 充-放电操作。对于充电操作，在非用电高峰时段，当充电贝内有待充电电池则开始充电，与M1中步骤4相同；对于放电操作，若处于用电高峰且充电贝内已装满满电电池，则执行放电操作，即式(14)中 $DCB_{working}^s(t)=1$ 时，表示开始执行放电操作。放电过程中电池主体电量变动情况如式(15)， $B_{DCI}^{s,i}SOC(t)$ 为放电电池主体 i 在 t 时刻的SOC， $B_{DCI}^{s,i}SOC(t_0)$ 为电池主体 i 在开始放电前的电池SOC。换电站的瞬时放电量见式(16)， $BSS_{dc}^s(t)$ 为换电站 s 在 t 时刻的瞬时有有效放电量。为保证换电站放电量稳定，需要时刻保证在充电贝进行放电操作时所有的充电贝中均放入满电电池。由于电池的剩余电量存在差异，设定当电池电量状态低于30%时（参照电动汽车最低充电标准^[25]），立即将换电站中满电电池从满电电池仓库拿出并替换充电贝中的待充电电池。

$$\begin{cases} DCB_{working}^s(t)=1 \\ (ncb_{idle}^s(t)=0 \cap t \in [s_p, e_p]) \\ DCB_{working}^s(t)=0 \\ (ncb_{idle}^s(t)>0 \cap t \notin [s_p, e_p]) \end{cases} \quad (14)$$

$$B_{DCI}^{s,i}SOC(t) = B_{DCI}^{s,i}SOC(t_0) - \int_{t_0}^t \frac{CB_DP}{C \cdot 60} dt \quad (15)$$

$$BSS_{dc}^s(t) = \frac{CB_DP \times CB_DE \times NCB \times CB_{working}^s(t)}{60} \quad (16)$$

5) 停止充-放电操作。在非用电高峰时段，当充电贝全部空闲时，即此时换电站已经没有待充电电池，停止充电操作；若在充电操作中途迎来电高峰时段，停止充电操作。当在用电高峰时段，换电站内满电的电池数量低于正在放电的空闲充电贝数量时，停止放电操作；当用电高峰转换到非用电高峰时，停止放电操作。

(5) M5模式

该模式为低谷充电-高峰放电，在M4的基础上增加了仅在用电低谷时才能进行充电的约束条件，即在M4的充-放电操作步骤中增加了只有处于用电低谷时才能进行充电的约束，其他行为与M4相同。

(6) M6~M10模式

该5种模式分别对应M1~M5的换电站运行模式，区别在于换电站增加了光伏发电的功能。本研究只考虑光伏发电的原因在于换电站往往位于城市内，而风力发电占地空间较大。设定当光伏发电的电量能满足该换电站的电力需求时，优先使用光伏产生的电能，否则使用电网电力弥补光伏电力不足的部分。

光伏发电系统的发电能力除受到发电板面积和太阳辐照度的影响外^[30]，还受到温度^[31]、安装角度^[32]等因素影响。精确计算光伏发电系统的电力是较为复杂的过程。为简化核算太阳能光伏系统发电量，参照Liu等^[33]和Yang等^[34]的研究量化光伏发电量，换电站 s 的光伏发电量计算公式如下：

$$PV_{power}^{s,j}(t) = \frac{PVS \times sr^j(t) \times TE}{60 \times 1000} \quad (17)$$

其中， PVS 为换电站光伏面板的总面积，考虑一般加油站面积为1000~1700m²左右，参照加油站面积，设定换电站占地面积与加油站相似，其建筑屋顶和部分空地可建设光伏板，所以设定每个换电站光伏面板面积为800m²； $sr^j(t)$ 为换电站所处地区在 j 季节时 t 时刻的太阳辐照度，单位为W/m²，考虑了4个季节太阳辐照度的差异， $j=1, 2, 3, 4$ 。 TE 为光伏系统发电量转换效率，其值设定为12.84%^[32]。

3.3 电网主体模型构建

电网主体属于城市私家车换电站运行系统的宏观层面，其行为只包括向换电站供电和接收换电站的逆向输电。由于电动汽车其能源消耗依赖电池的特殊属性，其在行驶过程中并不会消耗电网电量，只有在换电站在执行充放电行为时，才能触发电网的供电或逆向输电行为。所以电网主体电力消耗为所有换电站瞬时电力消耗总和（换电站放电时其电力消耗为负值），即电网瞬时电力消费量减去其逆向输电量和光伏发电量，如式（18）所示。

$$TE(t) = \sum_s BSS_{ec}^s(t) - BSS_{dc}^s(t) - PV_{power}^{s,j}(t) \quad (18)$$

4 仿真实验

北京市机动车保有量在全中国的城市中排名第一，截至2023年末，其私家机动车总保有量达到了530.20万辆。其中，燃油、增程式混动、插电混动、纯电动汽车分别达到了451.95、16.99、4.61和56.64万辆^①。北京市电动汽车保有量和充电桩数量也在中国各城市中位居前列，《北京市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》提出，到2025年，全市新能源汽车累计保有量力争达到200万辆。当前，北京市已有出租车和公交车采用换电站的形式为电动汽车提供换电服务。不难发

现，北京市在新能源汽车发展、基础设施建设等方面均具有典型性。因此，选取北京市的相关基础数据作为仿真实验关键参数数据，基于构建的城市私家车换电系统多主体行为模型，运用Anylogic软件实现仿真。

4.1 数据收集

4.1.1 出行数据

本研究涉及到的车辆出行行为数据包括：出行率、日出行次数、出行速度、日出行距离、每次行程的出发时间等。其中，出行率参数具体为：工作日出行率为51.0%，周末出行率为48.1%；日出行次数设定服从正态分布^[25]，工作日的均值和方差分别为3.41和2.42，周末的均值和方差分别为3.03和2.21^②；车辆行驶速度服从（25、60、80）的三角分布，由于北京市快速路行车速度限行80km/h，大部分主路限行60km/h，辅路和次干道限行40km/h，得出北京市高峰拥堵时段行车平均速度为24.26km/h^③；各个行程出发时间基于实际分布计算得到，图5为工作日和周末出发时间分布，但是对于日总出行距离分布数据只有均值，工作日为55.6km，周末为47.7km，缺乏标准差数据，该数据在后文模型校验中确定（日总出行距离服从正态分布^[35]）^②；车辆每次行程的行驶距离依据日总行驶距离和总出行次数随机产生。

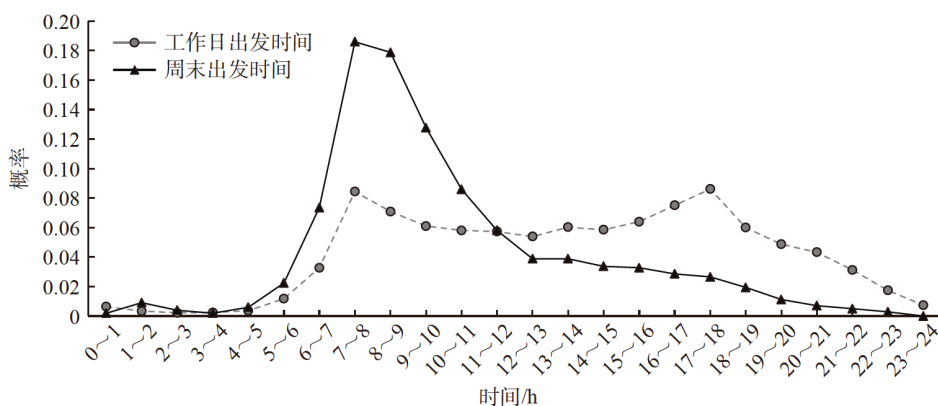


图5 车辆出发时间分布

Fig.5 Departure time distribution

① 数据来源为 <https://zhiiyun.souche.com>。② 数据来源为《2024北京市交通发展年度报告》。③ 数据来源为《2023年度中国城市交通报告》。

4.1.2 主体属性数据

考虑到目前还没有换电汽车投入使用,获取现有全部北京市车辆车主的家庭位置信息难度较大,本研究依据北京市人口密度分布,获取其经纬度值。北京有16个区331条街道。以2023年北京市331条街道的人口密度,随机生成车主的家庭位置^④。考虑到换电站建设需尽可能满足车主便捷换电需求,换电站的位置分布同样依据人口密度分布设定,人口密度越高,其建设换电站的数量越多。

由于考虑了换电站可利用光伏产生的电能对电池进行充电,因此,换电站中光伏发电系统受到太阳辐照度影响。对此,考虑北京市4个季节太阳辐照度的差异,如图6所示^[36]。

在3.2节介绍的换电站的10种运营模式中,M3~M5和M7~M10涉及在用电低谷和高峰时对电池进行充/放电操作。根据北京市用电实际数据,北京市用电高峰时段为:10:00~15:00和18:00~21:00;用电低谷时段为:23:00~24:00和0:00~7:00。

4.2 模型校验

模型校验指通过调整仿真模型中一些关键或人工设定的参数使得仿真模型运行结果贴近真实值,进而可确定这些参数值,以保证仿真模型的准确性^[37]。影响模型运行结果的关键因素为车辆出行行为,其中,影响车辆出行行为的关键指标——日出行

总距离的标准差是未知的。由于换电汽车目前缺乏真实数据,考虑到燃油汽车的出行和加油行为与换电汽车的出行和换电行为相似。因此,以北京市燃油汽车相关数据,套用构建的换电汽车的行为模型和加油站数据得出实验数据^⑤,通过对比仿真结果的到达时间分布和实际出行到达时间分布,验证模型的准确性和有效性,进而明确日出行次数分布函数的方差和日总出行距离分布函数的标准差以及主体的规模。2023年,北京市燃油私家车数量为459.53万辆,车系类型为1588个,每个车系类型均有固定的油箱容量和百公里油耗^⑥。

由于目前只有日出行距离正态分布函数的均值数据,缺乏标准差数据。对此,参照Zhang等^[38]研究的数据,其计算出的北京市车辆日出行距离的标准差为42。虽然其与本研究为同一对象,但因为存在样本差异所以其标准差数据不能直接在本研究运用,参照文献^[38]中标准差的数值设计了3种标准差数据值,见表4。SD1~SD3的取值以文献中的42作为工作日出行标准差,分别加减了车辆日出行距离的均值4。虽然以4为步长进行取值缺乏现实意义,但由于数据量庞大会对计算机和计算时间提出较高要求,所以以本研究设定的从3个备选数值中选择1个最贴近真实情况的参数设定方案也具有一定的进步。将本研究的日出行次数标准差数据和Hariri等^[39]研究的车辆出行数据进行对比分析,发现车辆周末出行的

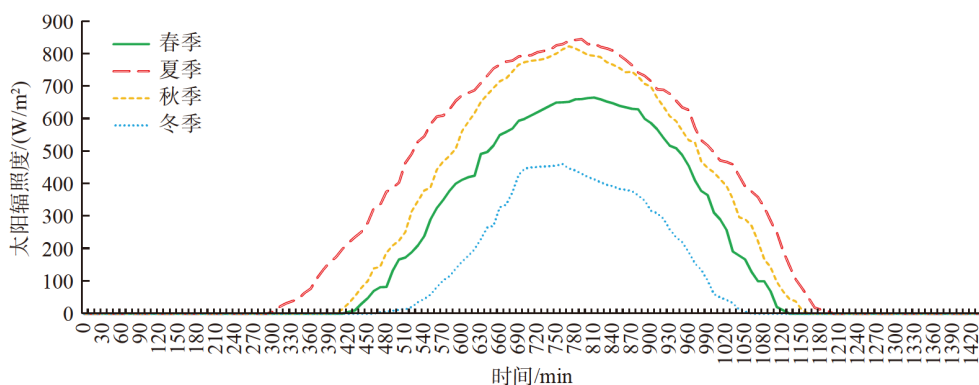


图6 北京市太阳辐照度分布曲线
Fig.6 Distribution curves of Beijing's solar radiation

④ 数据来源为 <https://landscan.ornl.gov/citations>。

⑤ 北京市共有加油站900个,其位置信息来自于电子地图, <https://lbs.amap.com>。

⑥ 各车系保有量数据来源为 <https://zhiyun.souche.com>; 各车系油箱容量和油耗数据来源为 <https://www.autohome.com.cn>。

表4 模型校验关键参数设置

Table 4 Key parameter values for model calibration

出行标准差	工作日	周末	主体规模	比值
SD1	38	34	AC1	1 : 10000
SD2	42	38	AC2	1 : 20000
SD3	46	42	AC3	1 : 50000

标准差总体小于工作日,采用上述同样的方法设计了与工作日标准差相对应的周末标准差。由于受到计算机硬件设备限制,模型中一个主体往往会代表多个现实中的主体,而主体规模也往往影响仿真的精度。因此,针对主体规模设计了AC1~AC3三种备选方案。

将表4中交叉组成的9种参数备选方案代入模型,对比模型计算得到的车辆各行程到达时间分布与现实数据的差异,选择最贴近现实数据的一组。模型运行时间为14d,截取第8~14d的结果作为最终结果。图7为实验对比结果,图中左侧为设定的9种参数和现实数据的车辆到达时间分布;右侧为对比参数的总绝对误差。不难发现,SD3-AC1参数方案最贴近实际。因此,燃油汽车主体规模设定为10000,车辆日总行程出行距离分布标准差工作日设定为46,周末设定为42。

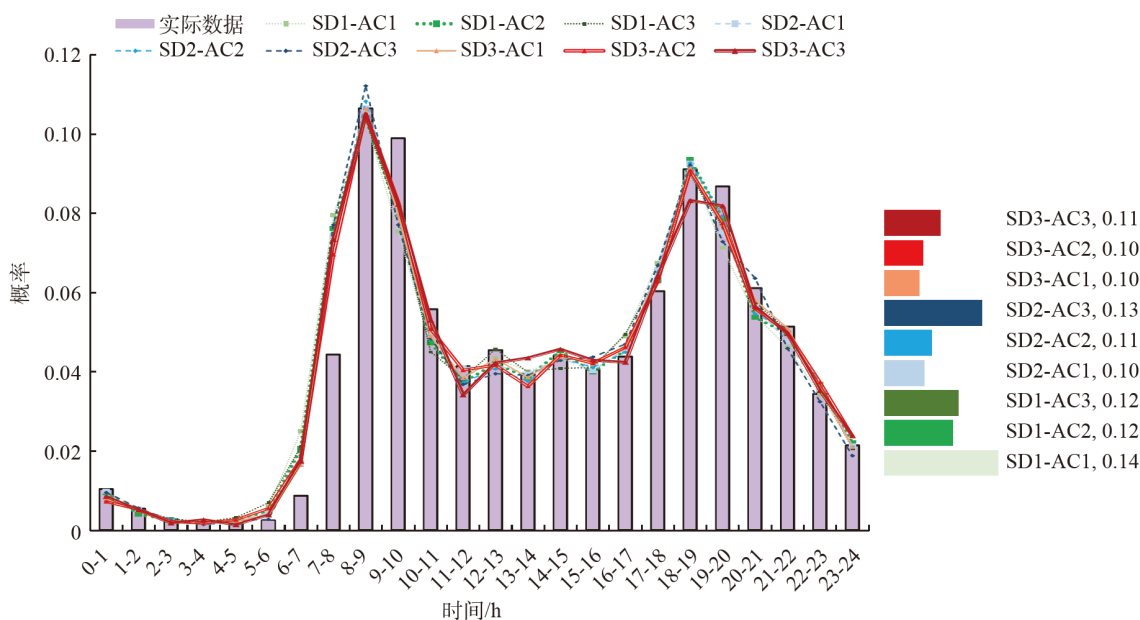


图7 车辆到达时间分布结果比较

Fig.7 Comparison of vehicle arrival time distribution.

5 多情境模拟及结果分析

基于构建的多主体仿真模型,通过对比电力消耗量、最大瞬时电力消耗和车辆等待时间,以确定最优的换电站运营模式以及换电站数量、备用电池数量、充电贝数量和电池容量。拟通过两个部分对换电站运营模式进行讨论,分别为:①10种换电站运行模式对比分析,确定适合北京市的换电站运营模式及换电站备用电池数量、充电贝数量和电池容量等数值;②在确定适合北京市的换电站运营模式下,根据设定换电汽车的数量,分析最适合北京市的换电站建设数量。

5.1 换电站运营模式情境和换电站关键参数模拟及结果分析

首先设定100个换电汽车主体,整个城市待换电池车数和备用电池数之比为1:1,即有100个备用电池。设定每个换电站配备50个备用电池,电池容量为50kWh,则该城市应有2个换电站。每个换电站的充电贝数量设定为25,即同一时刻最多可为25块电池充电。算例中每个BSEV主体的类型、大小和百公里电量消耗依据北京市2023年纯电动汽车的实际数据进行设定。以北京市夏季的太阳辐照度为基准。

将上述参数带入模型，计算换电站10种运行模式的车辆等待时间和电力消耗情况，通过对比分析10种换电站运营模式的优缺点，选择适合北京市的换电站运营模式。由于换电站运行模式M6~M10是在M1~M5

的基础上分别增加了光伏发电系统。所以可以先在M1~M5中筛选出较优的运营模式，进而讨论运营M6~M10优缺点，最后确定最适合北京市的换电站运营模式。图8为换电站运行模式M1~M5一周内总

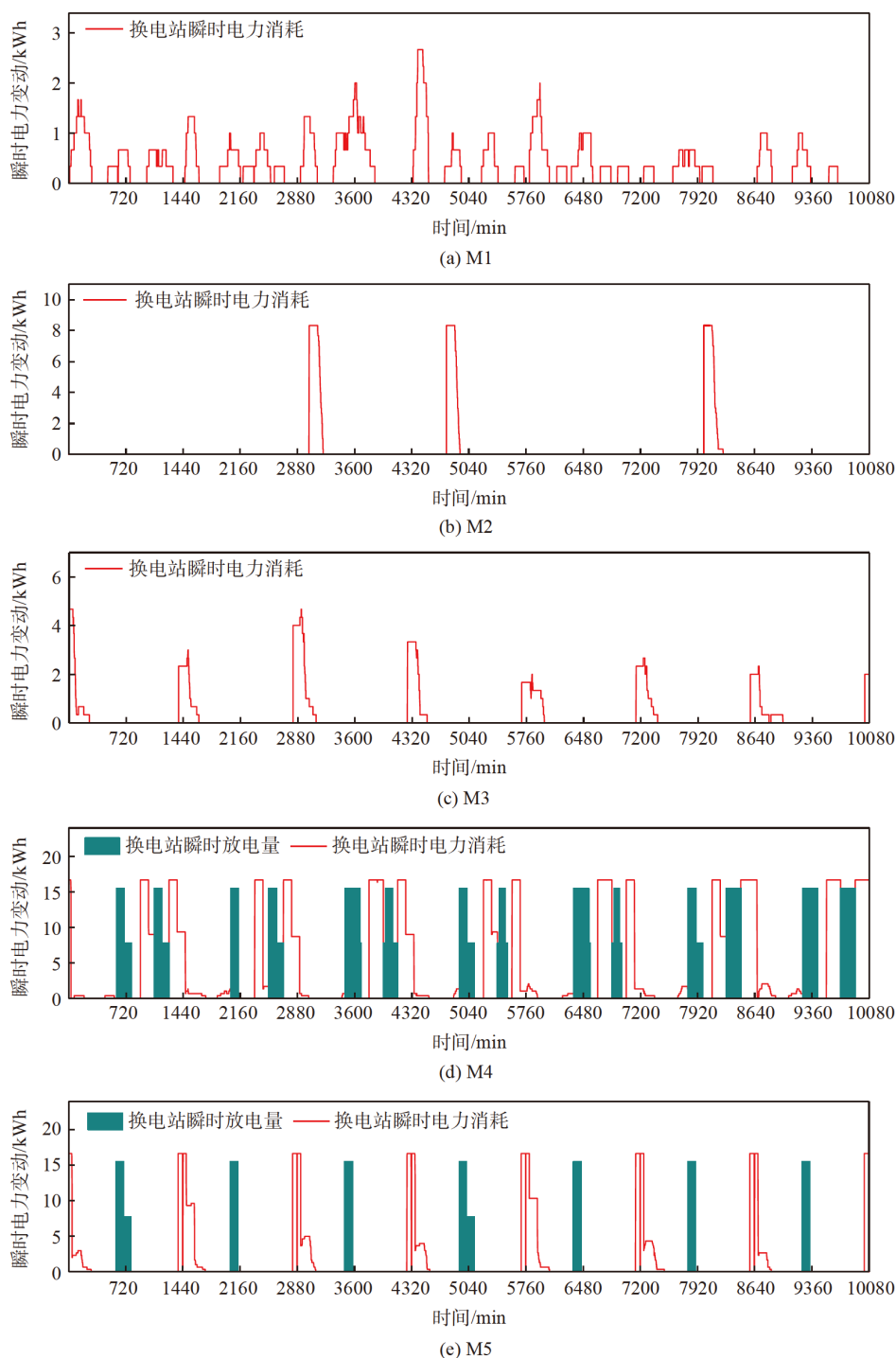


图8 换电站M1~M5运行模式总瞬时充/放电量

Fig.8 The total instantaneous electricity charging/discharging of BSSs in M1-M5

瞬时充/放电情况。

通过模型计算得出M1模式下,车辆总等待时间为0,一周的电力消耗总量为3579kWh。图8(a)为M1模式下换电站在一周内的瞬时电力消耗情况,在周四的1:16~2:20达到2.667kWh的最大瞬时电力消耗。一周内更换电池总数量为105次,图9为一周内每日更换电池的总次数,最大值为18,可推算每天共有18%的换电汽车需要到换电站更换电池。进而可知在运营模式M1下,若电池容量为50kWh时,备用电池总量与换电车辆数量比值为1:5时,可满足该城市的换电需求。瞬时电力消耗达到最大值时,共有8个充电贝在同时进行充电工作,说明100辆换电汽车使用8个充电贝即可满足充电需求,所以当充电贝总量与换电汽车总量比为1:10时,可满足该城市的换电站的充电需求。

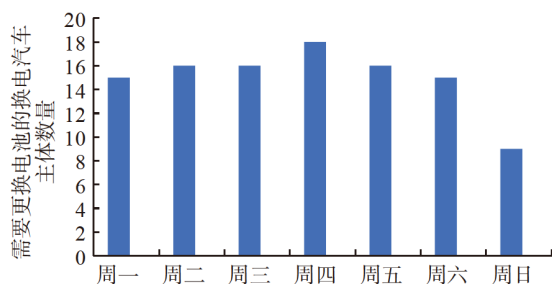


图9 一周内每天更换电池的总次数

Fig.9 Total number of batteries swapping per day in a week

M1的优点在于在充电贝空闲条件下能够对待充电电池进行实时充电,及时补充满电电池,所以该模式是所有模式中需要备用电池和充电贝数量最少的。进而可知在电池容量为50kWh时,城市的总备用电池数量与换电汽车数量最小的比值为1:5,城市的总充电贝数量与换电汽车数量最小的比值为1:10。若电池容量增加,该比值会进一步下降,反之会增加。

M2模式计算得到的车辆换电时总等待时间为0。该模式是当换电站内待充电电池达到换电站内充电贝总数时,才开始进行集中充电。案例设定一个换电站有25个充电贝,每个充电贝的工作功率为20kW,所以一个换电站工作时的瞬时电力消耗为8.33kWh/min。图8(b)为M2模式下的一周瞬时电力消耗,可以看出两个换电站不在同一时间进行充电操作,因为每

日需要更换电池的车辆数小于总充电贝数量(图9)。故M2模式所需的备用电池数量可以达到M1模式最小的电池配备数量,但是M2模式最大瞬时电力消耗更大。综合分析,换电站的M1模式优于M2模式。

M3模式只能在用电低谷期对待充电电池进行充电。北京市用电低谷时段为23:00~24:00和0:00~7:00,所以在M3模式下换电站只能在该时段为电池进行充电。图8(c)为M3模式一周内每分钟的瞬时电力消耗。一个容量为50kWh的电池在充电贝功率为20kW和充电效率为0.88的条件下,充电时间范围为102~170min。又因为每日用电低谷时段为7h,所以一天内充电贝可以至少进行两次的充电操作。由图9分析可知,城市最少需要配备相当于换电车辆数量20%的备用电池才能保证车辆不会出现等待时间。进而推算出当城市充电贝总数达到车辆数量的10%时,每天即可完成所有替换电池的充电任务。相较于M1模式,M3模式的优势在于能缓解城市电网用电峰值,且所需备用电池数量和充电贝的总数量与M1模式一致。

M4模式中充电贝在用电高峰时段向电网放电,在非用电高峰时段对电池进行充电。图8(d)为M4模式一周内的换电站瞬时消耗电网电力曲线和瞬时向电网输送电力曲线,可以发现放电曲线并不平稳,这是因为两个换电站在放电过程中满电电池数量不足,导致其中一个换电站无法放电。M4模式下的换电站一周内总能源消耗量为37908.82kWh,向电网回馈有效总电量为31155.00kWh,由于向电网放电的效率为0.93,所以放电总耗电量为33500.00kWh。进而可计算出为换电车辆电池充电的耗电量为4408.82kWh,向电网方向输电产生的损耗为2345.00kWh。向电网放电的电量损耗相当于为电池充电所耗电量的53.19%,超过50.00%。在M1模式中讨论了城市内充电贝的需求量最少为车辆总数的10%。由于北京市用电高峰时段为10:00~15:00和18:00~21:00,持续时长分别为420min和180min,期间间隔为3h,依据设定,城市需要最少配备10个充电贝。本研究设定放电电池的SOC值低于30%时为电量耗尽状态,需要用满电电池(SOC值大于90%的电池)替换该电池。由于放电功率为20kW,所以当充电贝装满电池时,可放电时长约为90min。第一个用电高峰时段若想保证稳定放

电,需进行5轮放电操作,消耗50个满电电池。经历第一个用电高峰后可对电池充电,电池充满最少需要102min。因两段用电高峰时间间隔为180min,所以最多进行两轮充电操作,即充满20个电池。第二个用电高峰的放电操作需要消耗掉20个满电电池,车辆到达换电站的耗电量最少需要10个满电电池。综上,如果换电站采用M4模式,最少需要110个备用电池,即车辆数与备用电池数之比达到1:1.1时才能满足用电需求。当前,北京市电力来源仍以火电为主,且向电网反向放电的效率在短期内无法提升。若采用向电网方向供电的模式将造成较大浪费,所以目前北京市并不适合反向向电网输送电能。且M4模式需要的电池电量比M1模式等多出5倍,而换电汽车电池经济成本较高,所以M4模式在当前并不具有经济优势。

图8(e)为换电站在M5模式下的一周内充放电曲线图。M5的运营模式为只有在用电低谷时才可进行充电,在用电高峰时段需向电网放电。相较于M4模式,其可为电池充电的时间更短,需要备用电池的数量更多,因此该模式也不可取。

综上分析,在M1~M5五种换电站运营模式中,M1和M3较其他运营模式更适合北京市换电技术的应用。换电站运行模式M6~M10是在M1~M5的基础上增加了光伏发电系统,且一一对应。所以只需在M1、M3、M6和M8中选出最适合北京市的换电站运营模式。虽然M3比M1具有可缓解用电压力的优势,但是M3只能在用电低谷时段(23:00~24:00和0:00~7:00)为电池充电。由图6可知,在用电低谷时段内,只有夏季6:00~7:00太阳辐照度大于0,所以在M3模式下增加光伏发电系统作用不大,即M8的光伏发电量非常少。而模式M6在满足光照条件下,可以时刻利用光伏发电系统。所以从消耗电网电力最少的角度出发,只需在M3和M6两种模式中进行选择。图10为换电站运行模式M6~M10的电力消耗情况。M6模式若不采用光伏发电系统,一周内需要消耗的总电量为3315.27kWh,使用光伏发电系统后消耗电网总电量为1126.36kWh,两个换电站在充电过程中使用光伏发电的电量为2188.91kWh,节省了约66%的电网电力。本研究假设北京市4个季节每天的太阳辐照度固定,换电站装备800m²的光伏面板,4个季节每

个换电站光伏发电系统满负载工作,可知春、夏、秋、冬一周最多发电量分别为3316.73、5113.45、4439.59、1700.71kWh。进而可知,光伏发电系统实际工作时间仅占20%,具有较强的发电潜力。从能源节约视角看,M6在所有运营模式中最适合北京市当前发展现状。

5.2 换电站建设数量情景模拟及结果分析

在5.1节中确定了当前最适合北京市的换电站运营模式为M6,且计算出当电池容量为50kWh时、城市中换电汽车数量与总备用电池数量比为5:1、换电汽车数量与总充电贝数量为10:1时,即可满足换电汽车电力需求。图11为2023年北京市各种型号纯电动汽车的电池容量数量占比。由图可知,电池容积在40~60kWh范围内占比最多,为54.65%。结合未来纯电动汽车升级改造为换电汽车的趋势以及电池容量在50kWh左右的广泛适用性,得出换电汽车电池和换电站内备用电池的容积设定为50kWh最为经济。

由于燃油汽车保有量及加油时间和模式与换电汽车模式相似,参照北京市2023年拥有加油站的数量900,设定换电站最多数量不超过1000。此外,每个换电站光伏发电系统均相同,所以城市中换电站数量越多,代表光伏系统发电量越多,消耗电网上的电力越少。同样,换电汽车前往换电站的行程越短,则消耗的电力就会越少。因此,换电站最大建设数量达到1000为最优。但是在现实中直接建立1000个换电站十分困难,在一定范围内,换电站的数量应与换电汽车的数量呈正相关。

由于换电汽车在换电站更换电池的时间与燃油汽车在加油站加油的时间相同,假设一个换电站最少能同时为两辆车进行换电(自动换电和人工换电)且不间断运行,那么一天最少可为288~576辆换电汽车提供服务。上文计算得出每天有20%的换电汽车需要进行更换电池,所以在换电站备用电池充足的情况下,1个换电站可以满足5760~11520辆换电汽车的换电需求。所以换电汽车数量与换电站数量比最少应设置为5000:1,恰好与2023年燃油汽车数量与加油站数量的比值5021:1相似。北京市划分为16个区,若每个区换电汽车数量低于5000时只能建

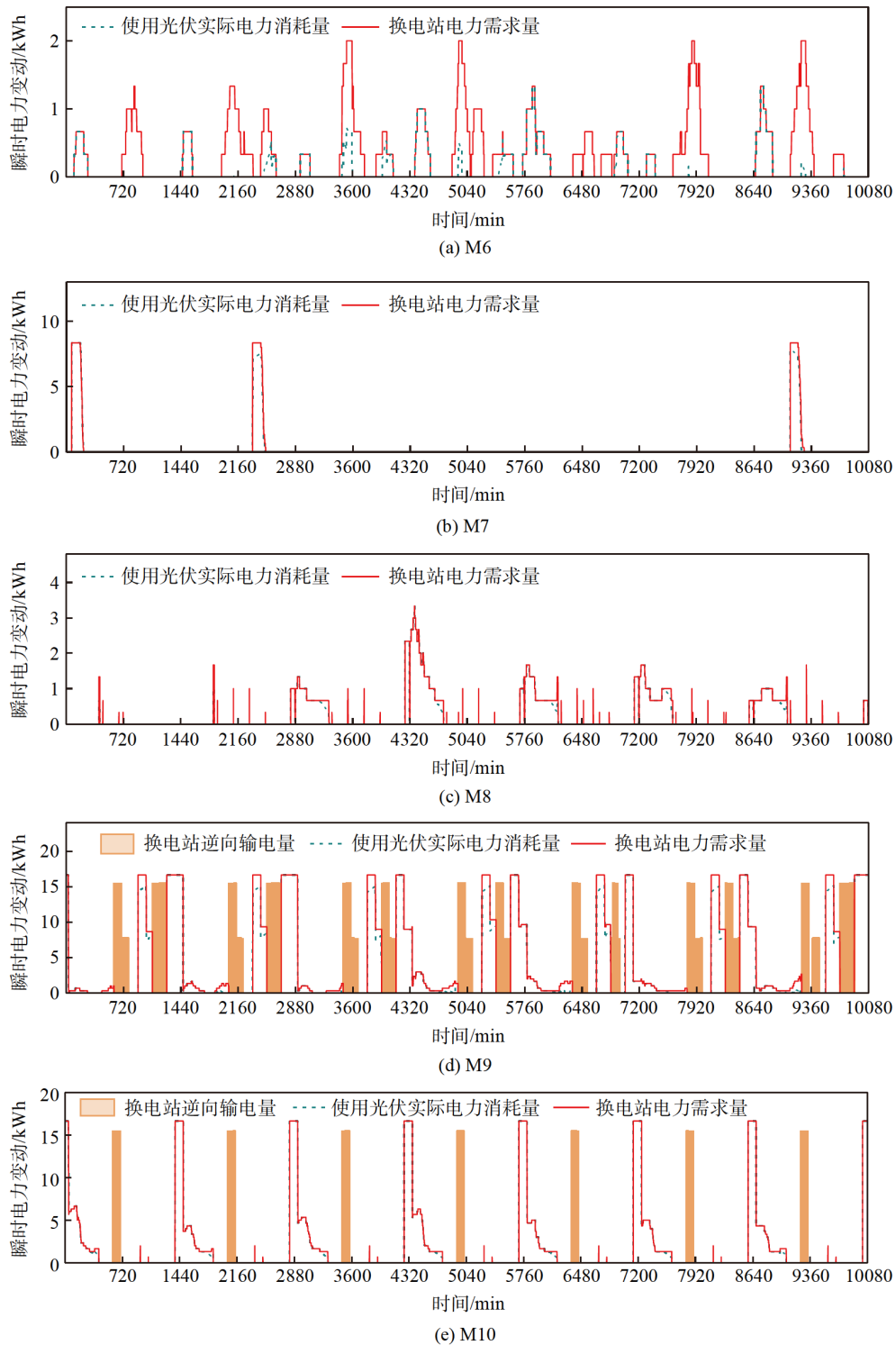


图10 换电站 M6~M10 运行模式总瞬时充/放电量

Fig.10 The total instantaneous electricity charging/discharging of BSSs in M6-M10

设1个换电站, 将对车主换电将造成极大的不便。所以按照北京市每个区最少建设2个换电站计算, 北京市最少应建设32个换电站。由此可知, 当北京市换

电汽车数量低于15万辆时, 换电站数量为32个; 当换电汽车数量大于15万辆且小于500万辆时, 北京市换电站数量应按照比值为5000:1的数量建设; 当换

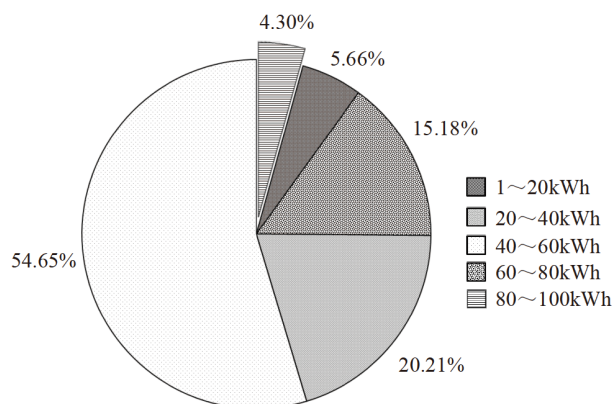


图11 2023年北京市纯电动汽车电池容量占比

Fig.11 Proportion of battery electric vehicle with different battery capacities in Beijing in 2023

电汽车数量大于500万辆时，可以建设1000个换电站。

6 结论

通过构建基于MAM的城市换电站系统仿真模型，本文以分钟级时间分辨率动态模拟了电动汽车用户、换电站及充电设施的交互行为。基于北京市典型场景进行多维度仿真分析，得出以下结论：

在运营模式优化方面，采用“即耗即充”策略配合光伏能源协同的混合供电模式，为当前北京市电池更换技术推广的最优解决方案。

在设施配比优化方面，电池容量设置50kWh时换电技术实施最为经济，得出了关键设施的最优配比关系：电池更换电动汽车数量与城市总电池备用数量、总充电贝数量、换电站数量的最小配比为5 : 1、10 : 1、5000 : 1。

本研究建立的动态仿真框架为城市级换电基础设施规划提供了量化决策工具，建议后续研究可进一步纳入不同气候区光伏出力特性、电池梯次利用的经济模型等扩展维度。

参考文献

[1] Zhao X, Doering O C, Tyner W E. The economic competitiveness and emissions of battery electric vehicles in China[J]. Applied Energy, 2015, 156: 666–675.

[2] Zhuge C X, Shao C F. Investigating the factors influencing the uptake of electric vehicles in Beijing, China: Statistical and spa-

tial perspectives[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 199–216.

- [3] Mahoor M, Hosseini Z S, Khodaei A. Least-cost operation of a battery swapping station with random customer requests[J]. Energy, 2019, 172: 913–921.
- [4] Xu M, Yang H, Wang S A. Mitigate the range anxiety: Siting battery charging stations for electric vehicle drivers[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 114: 164–188.
- [5] Yi H W, Zhang H, Li J H, et al. Hybrid intelligent optimization strategy of battery swapping station for electric vehicles based on reinforcement learning[J]. Computational Urban Science, 2025, 5(1): 6.
- [6] Kuperman A, Levy U, Goren J, et al. Battery charger for electric vehicle traction battery switch station[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5391–5399.
- [7] Yang J, Guo F, Zhang M. Optimal planning of swapping/charging station network with customer satisfaction[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 103: 174–197.
- [8] Wu H, Pang G K, Choy K L, et al. A charging-scheme decision model for electric vehicle battery swapping station using varied population evolutionary algorithms[J]. Applied Soft computing, 2017, 61: 905–920.
- [9] Tan X Q, Qu G N, Sun B, et al. Optimal scheduling of battery charging station serving electric vehicles based on battery swapping[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1372–1384.
- [10] Liang Y N, Cai H, Zou G L. Configuration and system operation for battery swapping stations in Beijing[J]. Energy, 2021, 214: 118883.
- [11] Jamian J J, Mustafa M W, Mokhlis H, et al. Simulation study on optimal placement and sizing of Battery Switching Station units using Artificial Bee Colony algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55: 592–601.
- [12] Schuller A, Flath C M, Gottwalt S. Quantifying load flexibility of electric vehicles for renewable energy integration[J]. Applied Energy, 2015, 151: 335–344.
- [13] Jordehi A R, Javadi M S, Catalão J P S. Energy management in microgrids with battery swap stations and var compensators[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 272: 122943.
- [14] Mahoor M, Hosseini Z S, Khodaei A. Least-cost operation of a battery swapping station with random customer requests[J]. Energy, 2019, 172: 913–921.
- [15] 韩顺杰, 于渲铎, 李东奇, 等. 基于改进量子粒子群算法的新能源汽车换电站优化布局[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(27): 11720–11725.
- [16] 程飞, 郭春林, 高泽阳, 等. 参与电网削峰调节的电动重卡换电站调度策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 120–128.
- [17] 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.

- [18] 李咸善, 詹梓澳, 李飞, 等. 考虑换电需求响应的换电站参与电能-调频市场竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 207–215.
- [19] Daina N, Sivakumar A, Polak J W. Modelling electric vehicles use: A survey on the methods[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 68: 447–460.
- [20] 张江, 李学伟. 人工社会——基于Agent的社会学仿真[J]. 系统工程, 2005, 23(1): 13–20.
- [21] 张硕, 张家源, 李英姿, 等. 多元主体驱动的新型电力系统市场化运行仿真关键技术[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 178–188.
- [22] 刘熙媛, 别朝红, 王锡凡. 基于多范式建模与仿真的电动汽车充换电站配置评估研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(7): 18–24.
- [23] 林湘宁, 王伟名, 随权, 等. 主动配电网-充换电站群-智慧社区群分层优化调度策略[J]. 广东电力, 2024, 37(10): 25–37.
- [24] Wang D, Gao J Y, Li P, et al. Modeling of plug-in electric vehicle travel patterns and charging load based on trip chain generation [J]. Journal of Power Sources, 2017, 359: 468–479.
- [25] Philipsen R, Brell T, Brost W, et al. Running on empty—Users' charging behavior of electric vehicles versus traditional refueling [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2018, 59: 475–492.
- [26] 胡方霞, 谷飞强, 周念成. 计及订单热力分布和充换电节点成本差异的电动网约车充换电路径最优规划方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 54–65.
- [27] Liu N, Chen Q F, Lu X Y, et al. A charging strategy for PV-based battery switch stations considering service availability and self-consumption of PV energy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 4878–4889.
- [28] Daryabari M K, Keypour R, Golmohamadi H. Robust self-scheduling of parking lot microgrids leveraging responsive electric vehicles[J]. Applied Energy, 2021, 290: 116802.
- [29] Sriabisha R, Kumar J A, Jayaprabakar J, et al. A comprehensive exploration of electric vehicles: Classification, charging methods, obstacles, and approaches to optimization[J]. Energy for Sustainable Development, 2025, 85: 101671.
- [30] Aaditya G, Pillai R, Mani M. An insight into real-time performance assessment of a building integrated photovoltaic (BIPV) installation in Bangalore (India)[J]. Energy for Sustainable Development, 2013, 17(5): 431–437.
- [31] Karthikeyan V, Sirisamphanwong C, Sukchai S, et al. Reducing PV module temperature with radiation based PV module incorporating composite phase change material[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29: 101346.
- [32] Liu Z J, Liu Y W, Wu D, et al. Performance and feasibility study of solar-air source pump systems for low-energy residential buildings in Alpine regions[J]. Journal of Cleaner production, 2020, 256: 120735.
- [33] Liu Z J, Zhang Y J, Yuan X T, et al. A comprehensive study of feasibility and applicability of building integrated photovoltaic (BIPV) systems in regions with high solar irradiance[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 307: 127240.
- [34] Yang H X, Burnett J, Ji J. Simple approach to cooling load component calculation through PV walls[J]. Energy and Buildings, 2000, 31(3): 285–290.
- [35] Kheradmand-Khanehdani H, Gitizadeh M. Well-being analysis of distribution network in the presence of electric vehicles[J]. Energy, 2018, 155: 610–619.
- [36] Chang K, Zhang Q Y. Development of a solar radiation model considering the hourly sunshine duration for all-sky conditions —A case study for Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2020, 234: 117617.
- [37] Fagiolo G, Moneta A, Windrum P. A critical guide to empirical validation of agent-based models in economics: Methodologies, procedures, and open problems[J]. Computational Economics, 2007, 30(3): 195–226.
- [38] Zhang X D, Zou Y, Fan J, et al. Usage pattern analysis of Beijing private electric vehicles based on real-world data[J]. Energy, 2019, 167: 1074–1085.
- [39] Hariri A M, Hejazi M A, Hashemi-Dezaki H. Investigation of impacts of plug-in hybrid electric vehicles' stochastic characteristics modeling on smart grid reliability under different charging scenarios[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 287: 125500.