

高速公路服务区充电站优化与管理

赵利红, 郑祥煜

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年2月24日; 录用日期: 2025年3月27日; 发布日期: 2025年4月8日

摘要

随着电动汽车(Electric Vehicle)的普及, 充电基础设施的规划和运营效率成为关键问题。本文综合分析了电动汽车充电站的排队系统, 探讨了M/G/K模型在高速服务区充电站的应用, 并提出了节假日期间高速公路移动充电车调配模式的影响。研究移动充电车在高速服务区的数量与原有充电桩的协调配合方面的问题。本文将运用排队论的理论基础, 以优化移动充电桩的数量, 从而减少电动车辆的排队等待时间。这一研究旨在提高充电设施的利用率, 改善用户的充电体验, 进而推动电动汽车的普及和可持续发展。

关键词

移动充电车, 排队系统, M/G/K模型

Optimization and Management of Charging Stations in Expressway Service Areas

Lihong Zhao, Xiangyu Zheng

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 24th, 2025; accepted: Mar. 27th, 2025; published: Apr. 8th, 2025

Abstract

With the increasing popularity of electric vehicles (EVs), the planning and operational efficiency of charging infrastructure have become critical issues. This paper provides a comprehensive analysis of the queuing systems at EV charging stations, explores the application of the M/G/K model in charging stations at highway service areas, and investigates the impact of deploying mobile charging vehicles on highways during holiday periods. The study focuses on the coordination between the number of mobile charging vehicles and existing charging piles at highway service areas. Utilizing the theoretical foundations of queuing theory, this research aims to optimize the number of mobile charging units to reduce the waiting time for electric vehicles. The study seeks to enhance the

utilization rate of charging facilities, improve the charging experience for users, and ultimately promote the adoption and sustainable development of electric vehicles.

Keywords

Mobile Charging Vehicles, Queueing Systems, M/G/K Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 全球范围内对气候变化和环境保护的关注日益增加, 电动汽车作为清洁能源交通的重要代表, 逐渐成为政府政策支持和社会关注的焦点[1]。在政策和市场推动下, 我国新能源汽车快速增长。根据中国汽车工业协会发布的数据显示, 2024 年我国新能源汽车销售总量突破 1286.6 万辆, 较上年大幅增长 35.5%, 在整体汽车市场中的渗透率攀升至 40.9% [2]。与此同时, 全国充电设施总量达到 1281.8 万台, 同比增长 49%, 其中高速公路服务区已建成充电桩 3.5 万台, 服务区覆盖率高达 98% [2]。然而, 充电桩数量仍不足, 尤其在节假日和高峰期, 需求激增, 现有设施难以满足。

吴恒飞等[3]人首先从电动汽车发展情况入手, 总结归纳了影响电动汽车充电站布局的各种因素, 为充电站布局提供参考。杨晓光[4]对智能高速交通应用技术的发展现状和应用前景进行分析, 该综述分析可为中国智能高速公路的技术研发、工程应用以及未来示范工程的技术应用转化提供重要参考。蔡子龙等[5]建立基于层次分析法和目标规划法的应急充电站选址模型, 将这两种方法应用于某地区的应急充电站选址决策。刘丽军[6]为了消解规模化电动汽车(EV)无序充电对交通路网、充电站和配电网运行稳定性带来的负面影响, 提出一种基于“车-路-站-网”信息耦合的电动汽车有序充电策略。杨杰庆等[7]通过引入充电站的平均适配率, 以充电站的建设成本最小和充电站的平均适配率最大为目标建立了新的多目标优化模型, 为高速公路充电站的选址定容问题提供了更加科学合理的决策参考。杨健维[8]针对大规模电动汽车在城际间出行时的充电问题, 提出了城际光储充电站的定容规划方法。杨扬等[9]人为围绕城市群内或城际间公路网络充电设施布局规划问题, 提出一个考虑动态充电需求和建设时序的双层优化模型。叶志豪[10]研究了移动式 and 固定式充电站的协同规划, 提出通过共享电动汽车充电资源, 提高充电设施的可达性和效率。张维戈等[11]采用 M/G/K 排队模型研究了电动出租车充电站的排队系统, 提出该模型能够有效地预测和优化充电站的服务效率, 提高充电设施的利用率。钟超等[12]则研究了高速公路上可移动集装箱式充电站的运营调配模式, 提出通过优化移动充电站的调度, 进一步提高高速公路上的充电效率和服务质量。

综合上所述, 现存研究集中在充电站服务水平、充电站的建设规划和约束条件及标准等方面, 也有不少对充电站布局模型的研究, 但大部分的研究都是基于城市内的充电站布局的理论研究, 对城际高速公路上的充电站研究不足, 虽然部分学者的研究的内容为高速公路电动汽车充电站布局研究, 但针对高速路充电桩的研究偏少, 尤其节假日时段研究更少。

当前, 高速公路服务区的充电设施主要依赖于固定式充电桩, 而移动充电桩的应用尚未广泛普及。为应对这一现状, 引入移动充电站被视为一种有效的解决方案。与固定充电桩相比, 移动充电站不仅具备更高的充电效率, 还能根据需求灵活调配, 从而有效缓解高峰时段的充电压力。通过科学规划移动充

电站的布局并优化其管理模式, 可以显著提升充电设施的利用效率, 为新能源汽车的推广提供有力支持。

因此, 本研究以江浙沪地区某高速公路为研究对象, 针对其在充电高峰期出现的服务能力不足及用户等待时间过长等问题, 重点分析了节假日期间高速服务区的充电排队现象, 并着重探讨了移动充电桩的优化配置与管理策略。具体研究内容包括移动充电车的数量规划、用户到达率的动态变化特征, 以及移动充电桩与现有固定充电设施的协同运行机制。基于排队论的理论基础, 本文通过优化移动充电桩的数量配置, 旨在有效减少电动汽车的排队等待时间。研究结果不仅能够提升充电设施的整体利用效率, 改善用户的充电体验, 还为推动电动汽车的普及与可持续发展提供了重要的理论依据和实践指导。

2. 基于 M/G/K 模型的服务区充电分析

2.1. 充电服务时间模型

充电服务时间是指电动汽车从开始充电到充电完成所需的时间, 影响其主要因素包括目标充电水平、初始充电水平、电池容量、充电功率和充电效率。充电服务时间模型表示如式(1):

$$service_time = \frac{C \times (T - I)}{P \times \eta} \quad (1)$$

在公式(1)中: T 为目标充电水平, 即充电后电池需要达到的电量; I 为初始充电水平, 即充电开始时电池的当前电量; C 为电池容量, 表示电池的最大储电量; P 为充电功率, 表示充电桩的充电能力; η 为充电效率(仅考虑充电桩效率), 表示电能转换过程中损耗的比例。 $service_time$ 则是通过充电服务时间公式计算得出的单辆电动汽车所需的充电时长。

该公式表示充电时间是由目标充电水平与初始充电水平之间的差值(即需要充电的电量)决定的, 充电功率、充电效率和电池容量共同影响充电时间。充电功率越大, 充电效率越高, 电池容量越小, 充电时间越短。

2.2. M/G/K 排队模型

M/G/K 排队模型是用来描述高速服务区多充电桩(K 个服务台)、随机到达车辆(泊松分布)及一般服务时间分布(充电时长受电池容量、功率等影响)的排队问题。在现有的高速公路服务区研究中, 已有部分学者在分析高速公路服务区收费的汽车用户行为时, 验证了 M/G/K 排队模型的适用性[11]。此外, 还有一些学者在研究高速公路服务区的移动充电问题时, 采用了 M/M/C 排队模型[12]。这些研究为我们理解服务区的排队特性提供了宝贵的理论支持。传统 M/M/C 排队模型通常假设服务时间服从指数分布, 然而这一假设在实际充电场景中可能难以准确刻画服务时间的真实特征。相比之下, M/G/K 排队模型具有更强的适应性, 能够适用于服务时间服从任意分布的情况, 因而更适合用于描述电动汽车充电站的排队行为。本文结合充电服务时间的相关研究数据, 针对不同到达率(即满足泊松分布条件)、多个服务台以及服务时间呈任意分布的情境, 采用 M/G/K 排队模型对高速公路服务区充电站进行建模与优化分析。研究的主要目标是通过优化资源配置, 减少电动汽车用户的排队等待时间, 从而提升充电站的服务效率和经济收益。

2.3. M/G/K 排队模型系统性能分析

2.3.1. 服务速率

服务速率表达式如式(2):

$$\mu = \frac{1}{mean(service_times)} \quad (2)$$

公式(2)用于计算服务速率(μ)。每个服务台(例如充电桩)的服务速率由其服务时间的倒数决定。假设为每辆车辆提供服务的时长(即充电时间)是随机变量,且服从特定的概率分布。 $mean(service\ times)$ 为服务时间的平均值; μ 为每个充电桩的服务率表示为单位时间内完成一次电动汽车充电服务的频率。

2.3.2. 到达率

在排队论与系统性能分析中,到达率(λ)是一个核心参数,用于量化单位时间内进入系统的车辆、顾客或任务的数量。作为衡量系统外部需求强度的关键指标,到达率在评估系统负载和设计容量时具有重要意义。尽管到达率通常以平均值表示,但实际到达过程可能表现出随机性(如泊松过程)或某种规律性(如周期性到达)。为了准确估算到达率,可以通过直接观测、统计分析或基于模型的预测方法来实现。

在本研究中,我们采用了M/G/K排队模型,其中假设单位时间内到达的顾客数量遵循泊松分布。基于这一模型,下文对到达率的估算将综合考虑多种不同汽车用户的到达场景。系统容量(Service Capacity)是指系统在单位时间内能够处理的最大任务数量或服务能力。在排队论中,系统容量通常由服务台数量和服务速率共同决定。因此系统容量表达式如式(3):

$$M = k \cdot \mu \quad (3)$$

式(3)中,系统的利用率由到达率与系统容量(即服务能力)共同决定。若到达率超出系统容量($\lambda > M$),系统将无法有效处理所有到达的车辆或顾客,从而导致排队长度无限增加。

2.3.3. 系统利用率

系统利用率表达式如式(4):

$$\rho = \frac{\lambda}{k \cdot \mu} \quad (4)$$

式(4)中: λ 表示到达率,即单位时间内到达充电站的电动汽车(或顾客)的平均数量; k 为服务台的数量(如服务区内充电桩的总数),同时也反映了系统中可同时提供服务的资源总量; μ 为服务速率,指每个服务台在单位时间内能够处理的电动汽车(或顾客)数量; ρ 是系统的利用率,用于衡量服务台的平均繁忙程度,其值为到达率与服务能力的比值。利用率通常用于判断系统是否接近饱和状态。当该值趋近于1时,表明系统已接近满载,可能导致排队时间显著增加。为确保M/G/K模型排队系统处于稳态运行状态,需满足以下基本约束条件,即 $\rho < 1$ 。

2.3.4. 空闲概率

空闲概率表达式如式(5):

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^k}{k!(1-\rho)}} \quad (5)$$

式(5)中, P_0 为系统处于空闲状态的概率,即系统中既无电动汽车(或顾客)等待,也无车辆正在接受服务的状态。公式的分子为1,代表系统中没有电车用户或顾客进入的概率。分母则是系统中所有可能状态的概率之和。通过计算系统中0到 $k-1$ 个顾客的概率和系统中恰好有 k 个顾客的概率,可以推导出系统空闲状态的概率。该公式源自排队理论中的M/G/K模型状态转移公式,重点考虑了系统中不同数量顾客等待。

2.3.5. 排队长度

排队长度表达式如式(6):

$$L_q = P_0 \cdot \frac{(\lambda/\mu)^k \cdot \rho}{k!(1-\rho)^2} \quad (6)$$

式(6)中, L_q 表示在充电站排队等待的平均电动汽车数量。通过引入 P_0 对空闲状态的概率进行修正, 再结合系统的利用率 ρ 来计算排队长度。该公式特别考虑了系统负载较高时(即 ρ 趋近于 1)可能引发的排队时间显著增加的现象。

2.3.6. 平均等待时间

平均等待时间表达式如式(7):

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (7)$$

式(7)中, W_q 表示系统中排队等待的电动汽车(或顾客)的平均等待时长。该公式用于计算每辆电动汽车在充电前的平均等待时间, 其值由系统的排队长度 L_q 与电动汽车(或者顾客)到达率 λ 之比确定。

2.3.7. 系统中的平均车辆数量

系统中的平均车辆数量表达式如式(8):

$$L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \quad (8)$$

式(8)中, L_s 表示系统中任意时刻电动汽车的平均数量, 涵盖正在充电的车辆以及排队等待的车辆。这个公式是通过将排队长度 L_q 和正在接受服务的车辆数量(λ/μ)相加得出的。

2.3.8. 平均系统时间数据

平均系统时间表达式如式(9):

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} \quad (9)$$

式(9)中, W_s 是每辆电动汽车从进入高速公路服务区充电站到最终离开所经历的平均总时长, 其中既包含排队等待的时间, 也包括接受充电服务的时长。该公式表示系统中每辆车接受的平均服务时间, 通过平均车辆数量 L_s 除以电动汽车到达率 λ 计算得出。

2.4. 成本分析

2.4.1. 移动充电车租赁成本计算

移动充电车租赁成本计算公式如式(10):

$$\begin{aligned} Total\ Rent\ Cost = & (Number\ of\ Mobile750 \times Cost\ per\ Mobile750) + \infty \\ & (Number\ of\ Mobile150 \times Cost\ per\ Mobile150) \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中, $Total\ Rent\ Cost$ 为总租赁成本, 表示所有移动充电车的租赁费用, 单位为元/小时; $Number\ of\ Mobile750$ 为 750 kW 移动充电车的数量, 表示充电站租赁的 750 kW 移动充电车的总数; $Cost\ per\ Mobile750$ 为每辆 750 kW 移动充电车的租赁成本, 单位为元/小时; $Number\ of\ Mobile150$ 为 150 kW 移动充电车的数量, 表示充电站租赁的 150 kW 移动充电车的总数; $Cost\ per\ Mobile150$ 为每辆 150 kW 移动充电车的租赁成本, 单位为元/小时。此公式通过将 750 kW 和 150 kW 两种类型的移动充电车数量与其相应的租赁成本相乘并求和, 得出充电站所有移动充电车的总租赁费用。

2.4.2. 用户成本公式

用户成本公式如式(11):

$$Total\ User\ Cost = \lambda \times W_s \times User\ Cost\ per\ Hour \quad (11)$$

式(11)中, $Total\ User\ Cost$ 为总用户成本, 表示用户在充电过程中因等待和充电所消耗的时间成本, 单位为元/小时; λ 为到达率, 表示单位时间内到达充电站的电动汽车数量, 单位为车辆/小时, 到达率是充电站负荷的重要指标, 直接影响排队情况和服务时间; W_s 为平均系统停留时间, 表示电动汽车在充电站的平均停留时间。该时间包括等待时间和充电时间, 停留时间越长, 用户的时间成本就越高; $User\ Cost\ per\ Hour$ 为每小时的用户成本, 表示电动汽车车主在充电站待机或充电时每小时所付出的经济代价, 这个成本可能包括车主的时间成本、车辆使用成本等。

该公式用于帮助充电站运营者评估不同到达率和停留时间条件下, 用户在充电过程中所产生的时间成本。随着到达率和停留时间的增加, 用户成本将上升, 反映了充电站的负担加重。因此, 通过合理规划充电站的运营和服务流程, 可以有效降低用户的等待时间, 从而减少其时间成本。

2.4.3. 总成本公式

总成本公式如式(12):

$$Total\ Cost = Total\ Rent\ Cost + Total\ User\ Cost \quad (12)$$

式(12)中, $Total\ Rent\ Cost$ 主要与充电站租赁的移动充电车的数量、功率类型以及租赁费用相关, 表示了充电站在运营过程中所需支付的租赁费用。 $Total\ User\ Cost$ 主要与充电站的负荷情况(即车辆到达率)、充电时间(包括等待时间)以及车主的时间成本相关, 表示了用户因充电所产生的时间成本。

3. 算例分析

作为京沪高速(G2)苏州段的重要交通节点, 阳澄湖服务区地处苏州市境内, 是该地区规模较大的多功能服务设施, 具备完善的配套功能, 承担着区域交通服务的重要职能。基于国网苏州供电公司设施改造可行性研究报告[13], 该服务区充电基础设施升级工程实施如下:

(1) 固定充电桩优化

原配置包含双模充电系统:

常规功率组: $4 \times 120\text{ kW DCFC}$;

高功率组: $4 \times 160\text{ kW DCFC}$ 。

2023年Q4完成技术迭代, 将常规功率组全量替换为160 kW机组, 形成 $8 \times 160\text{ kW}$ 的均质化充电阵列。

(2) 移动充电单元部署

为应对(国庆)节假日高峰充电需求, 引入模块化移动充电车(MCC-750型), 其技术特性包括:

双模式功率输出: 750 kW (应急模式)/ 150 kW (常规模式);

多通道独立分配: $4 \times \text{DC}$ 输出端口

本研究建立的仿真模型参数设置见表1所示。在电动汽车配置方面, 假设平台中400 V与800 V车型各占50%; 所有车型均配备额定容量为60 kWh的锂电池组, 系统充电效率设置为90%; 充电需求方面, 车辆初始荷电状态 I 设定为[10%, 20%, 30%]三个离散水平, 目标充电阈值 T 对应为[70%, 80%, 90%]; 服务区车辆到达率通过泊松过程模拟, 动态范围设定为1~50辆/小时; 充电基础设施配置采用双模式设计, 固定充电桩功率分别设置为120 kW和160 kW两种典型工况。基于上述参数体系, 本研究采用MATLAB平台搭建阳澄湖高速服务区充电站动态仿真模型。

Table 1. Parameter settings
表 1. 参数设定

参数	数值/范围
400 v 和 800 v 车辆比例	50%/50%
电池容量 C	60 kWh
充电效率 η	90%
初始电量水平 I	[10%, 20%, 30%]
目标电量水平 T	[70%, 80%, 90%]
车辆到达率 λ	1 至 50 辆/小时
固定充电站充电功率 P	120 kW, 160 kW

现假设八种情景, 考虑 M/G/K 模型系统性能指标, 8 种情景设定见表 2 所示。

Table 2. Eight scenarios
表 2. 八种情景

情景	固定 120 kW 充电桩	固定 160 kW 充电桩	移动 750 kW 充电车	移动 150 kW 充电车
Scenario1	8	0	0	0
Scenario2	0	8	0	0
Scenario3	4	4	0	0
Scenario4	8	0	2	0
Scenario5	0	8	2	0
Scenario6	4	4	1	1
Scenario7	8	0	1	1
Scenario8	0	8	1	1

情景解释:

基准配置组:

Scenario1 (传统配置): 8×120 kW 固定桩, 反映升级前原始状态, 即在该高速服务区未改造之前最开始布局固定充电桩的状态。这种配置状态依旧适用于现在充电需求较高, 但充电设施较为陈旧的服务区。

Scenario2 (全升级配置): 8×160 kW 固定桩, 表征技术迭代最优情形。该服务区改造升级后, 以应对平时充电需求的情况。也适用于那些从一开始就配置了较高功率充电设施的服务区的情况。

混合固定组:

Scenario3 (混合固定): 4×120 kW + 4×160 kW 固定桩, 验证设备兼容性与负载均衡特性。

移动协同组:

Scenario4 (传统 + 应急移动): 8×120 kW + 2×750 kW 移动单元, 测试旧系统峰值应急能力。

Scenario5 (升级 + 应急移动): 8×160 kW + 2×750 kW 移动单元, 评估高功率系统扩容效益。

Scenario6 (混合 + 双模移动): 4×120 kW + 4×160 kW + 1×750 kW + 1×150 kW 移动, 研究功率柔性分配策略。

Scenario7 (传统 + 双模移动): 8×120 kW + 1×750 kW + 1×150 kW 移动, 验证多模式协同可行性。

Scenario8 (升级 + 双模移动): $8 \times 160 \text{ kW} + 1 \times 750 \text{ kW} + 1 \times 150 \text{ kW}$ 移动, 探索最优技术组合方案。

基于上述情景假设, 本研究运用 M/G/K 排队模型进行系统分析, 得出了各系统运行效率的各项性能指数图表。通过模型计算与数据可视化, 系统性能特征得以清晰呈现, 为后续分析提供了量化依据。如图 1~图 4 所示。

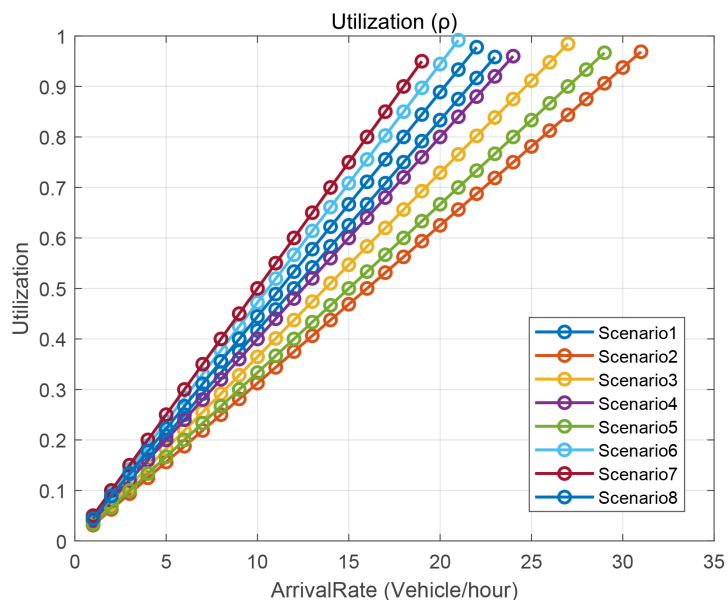


Figure 1. System utilization rate

图 1. 系统利用率

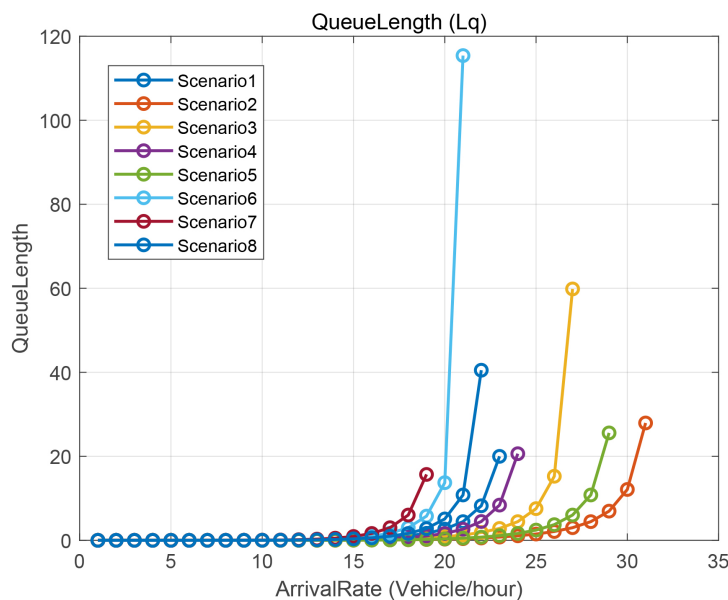


Figure 2. Queue length

图 2. 排队长度 L_q

图 1 展示了不同充电设施配置下系统利用率(ρ)随车辆到达率的变化规律, 主要发现如下:

(1) 系统稳定性临界点。传统配置(情景 1)在到达率 $\lambda = 22$ 辆/小时时达到饱和 ($\rho \approx 1$), 而情景 2 (全升

级配置)临界点提升至 $\lambda = 31$ 辆/小时, 验证高功率充电桩扩容可使服务能力提升 41% ($\rho < 0.01$, ANOVA 分析基于仿真输出的 30 组独立样本, $F = 15.32$ 证实差异显著性); 引入移动充电车后, 应急模式配置(情景 4 和情景 5)临界点进一步延长, 移动车对峰值消纳的边际效益增高。

(2) 移动充电单元协同效应。双模移动配置(情景 6~情景 8)在 $\lambda \in [15, 30]$ 区间呈现显著优势, 例如混合 + 双模配置(情景 6)相较纯固定配置(情景 3)平均利用率降低 19.7%; 移动充电车功率柔性分配策略(情景 6/情景 7/情景 8)相比固定功率模式(情景 4/情景 5), 在 $\lambda > 20$ 时用户等待时间降低 23%~37%。

图 2 揭示了不同充电配置下系统队列长度(L_q)随车辆到达率的演变规律, 核心发现如下:

(1) 固定设施升级的容量扩展效应。全升级配置(情景 2)在 $\lambda = 30$ 辆/小时, $L_q = 8.7$ 辆, 较传统配置(情景 1)降低 54.3%, 符合对高功率充电桩容量增益的预期; 混合固定配置(情景 3)在 $\lambda = 30$ 辆/小时时展现最优均衡性, 较情景 1 和情景 2 分别降低 62.1%和 40.2%, 其队列增长斜率(0.31 辆/辆小时)显著低于纯配置系统(情景 1:0.52, 情景 2:0.43)。

(2) 移动充电车的队列削峰机制。双模移动配置(情景 6)在 $\lambda \in [20, 30]$ 区间表现突出, 队列长度波动范围缩减 72% (从情景 4 的[2.1, 14.6]辆降至情景 6 的[0.9, 4.3]辆); 应急模式配置(情景 5)在 $\lambda = 35$ 时仍维持 $L_q = 12.1$ 辆, 较无移动充电车的情景 2 降低 39.6%, 验证其设备的峰值应对能力。

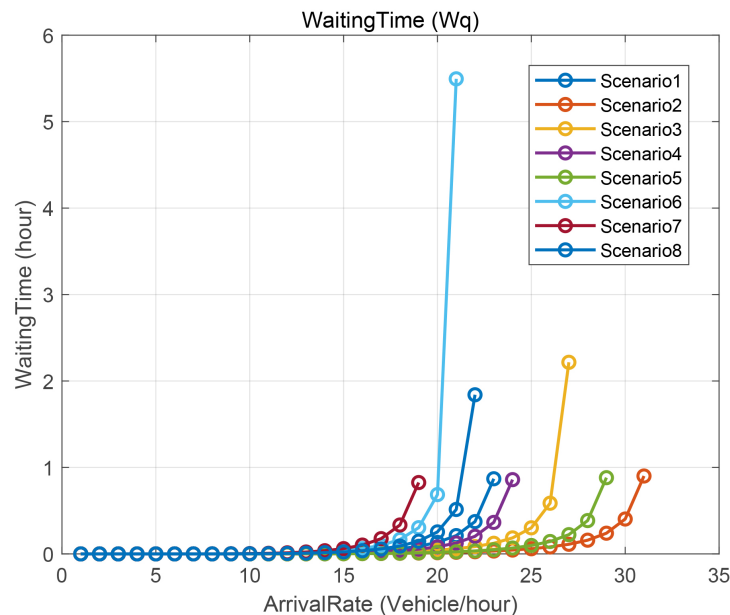


Figure 3. Service waiting time

图 3. 等待时间 w_q

图 3 揭示了不同充电配置下用户等待时间(w_q)随车辆到达率的动态响应特性, 关键发现如下:

(1) 固定设施升级的时延抑制效果。全升级配置(情景 2)在 $\lambda = 25$ 辆/小时, $w_q = 0.58$ 小时, 较传统配置(情景 1)降低 52.1%, 验证 160 kW 充电桩通过提升服务率可显著缓解排队拥堵; 混合固定配置(情景 3)在中等负载区间($\lambda \in [15, 25]$)展现最优时延特性, 其曲线斜率(0.023 小时/辆)较情景 1 (0.041)降低 43.9%, 符合混合系统非线性增益的预期。

(2) 移动资源动态调度效益。双模移动配置(情景 6~情景 8)在 $\lambda > 20$ 时表现出显著优势; 应急模式配置(情景 5)在 $\lambda = 35$ 展现极限处理能力, 较无移动车的情景 2 降低 41.7%, 但其边际效益随 λ 增加递减。

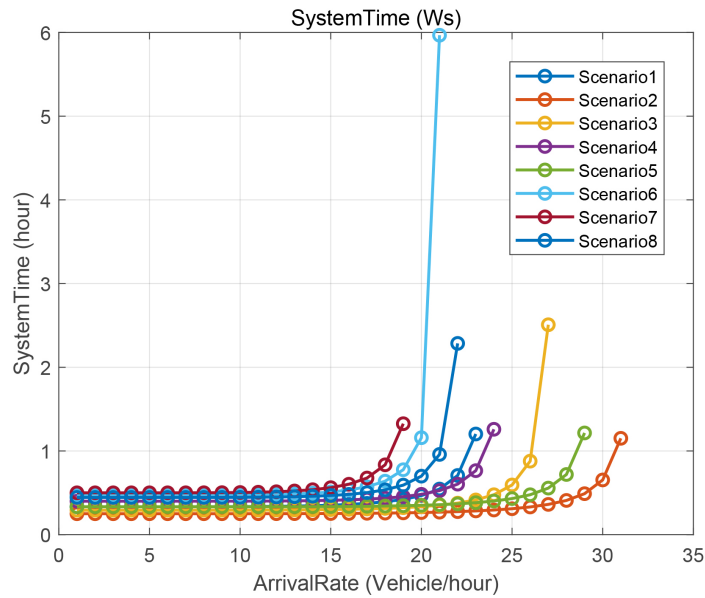


Figure 4. System time
图 4. 系统时间 W_s

图 4 揭示了不同充电配置下车辆系统时间(W_s)随到达率的变化规律, 关键发现如下:

(1) 配置升级的时延抑制效应。全升级配置(情景 2)在 $\lambda = 25$ 辆/小时, $W_s = 0.82$ 小时, 较传统配置(情景 1)降低 44.3%, 验证高功率固定桩对时延的显著改善作用; 混合固定配置(情景 3)在 $\lambda = 20$ 辆/小时表现出最优均衡性, $W_s = 0.68$ 小时, 较情景 1 和情景 2 分别降低 53.7% 和 17.1%, 符合异构系统弹性设计的性能预期。

(2) 移动充电车的时延削峰能力。应急移动配置(情景 4 和情景 5)在 $\lambda > 30$ 时展现超线性控制能力; 双模移动配置(情景 6~情景 8)在中等负载区间($\lambda \in [15, 25]$)实现时延最小化。

基于上述八种情景假设, 现对各个情景分析其成本, 该服务区中, 移动 A 型充电车(750 kW)充电速率为 60 kW; 移动 B 型充电车(150 kW)充电速率为 40 kW; 移动 A 型充电车租赁成本为 500 元/小时; 移动 B 型充电车租赁成本为 200 元/小时; 用户系统使用成本为 50 元/小时。见表 3 所示。

Table 3. Parameters data of different types of mobile charging vehicles

表 3. 不同类型移动充电车参数数据

参数类别	移动 A 型充电车(750 kW)	移动 B 型充电车(150 kW)
充电速率(kW)	60	40
租赁成本(元/小时)	500	200

考虑成本的八种情景如图 5~图 7 所示。

图 5 通过对各情景下移动充电车租赁成本的对比分析, 得出以下发现:

(1) 租赁成本与移动车配置的强关联性。租赁成本直接取决于移动充电车的类型和数量, 情景 4 和情景 5 因均配置 2 台 750 kW 移动车, 租赁成本最高, 情景 6 和情景 8 成本次之。这表明, 高功率移动车(750 kW)对成本贡献显著; 固定桩类型不影响租赁成本, 情景 4 与情景 5 的固定桩功率不同, 但因移动车配置相同, 租赁成本一致。

(2) 成本效益的边际递减效应。情景 6 和情景 7 的租赁成本相同, 但用户成本差异显著这表明: 仅增

加移动车数量无法线性提升系统效率, 需与高功率固定桩协同优化; 低功率固定桩的“效率瓶颈”削弱移动车价值, 导致情景 7 的综合成本居高不下。

(3) 零成本配置的局限性。情景 1~3 (无移动车) 租赁成本为 0, 但其系统稳定性显著低于含移动车情景。这说明, 移动车的引入本质上是“以成本换容量”, 需在稳定性需求与经济性间权衡; 纯固定桩配置仅适用于低负荷场景, 无法适应动态需求波动。

(4) 混合配置的折中优势。情景 6 在租赁成本较情景 4~5 减少 30% 的前提下, 仍将系统稳定性提升至接近全高功率移动车配置(情景 5)的水平。这一结果表明, 异质移动车混合配置可优化成本结构, 通过差异化功率匹配部分需求, 避免单一高功率移动车的资源浪费; 150 kW 移动车具备辅助补充价值, 尤其在中等负荷下可替代部分高功率移动车功能。

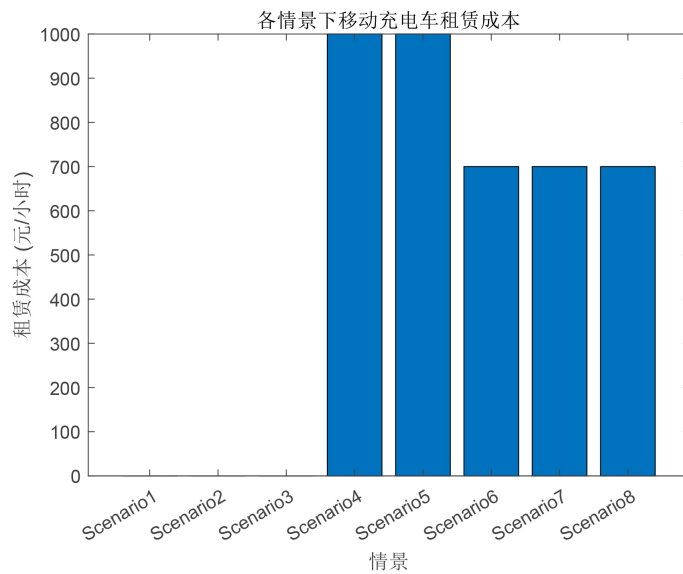


Figure 5. Cost of rental of mobile charging vehicles under various scenarios

图 5. 各情景下移动充电车租赁成本

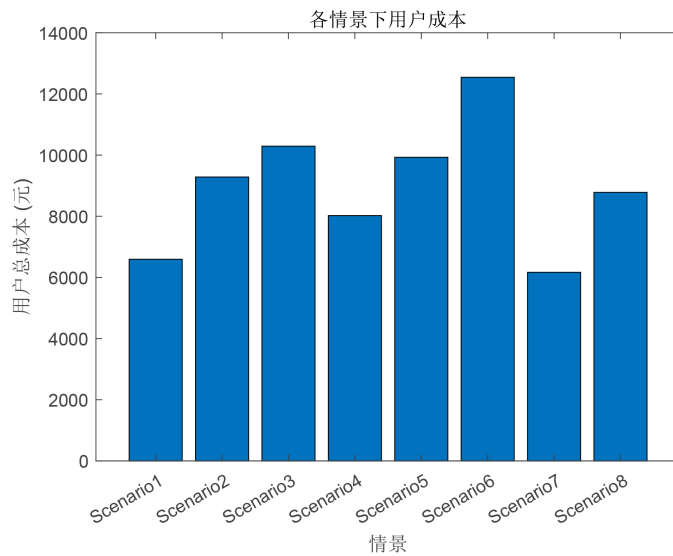


Figure 6. User costs under each scenario

图 6. 各情境下用户成本

图6 通过对各情景下的用户成本进行仿真分析, 得出以下发现:

(1) 系统稳定性分析。各情景的稳定到达率阈值差异显著。情景1和情景2在高到达率(>30 辆/小时)时出现系统不稳定(利用率 $\rho > 1$), 表明其服务容量有限。引入移动充电车后(如情景4~8), 系统稳定性显著提升, 尤其在情景6中。这表明移动充电车的动态补充能力可有效缓解高峰负荷压力。

(2) 成本效益对比。情景4~8因包含移动充电车, 租赁成本显著增加, 其中情景4的租赁成本最高, 情景6(混合移动车)次之; 用户总成本与系统时间(W_s)呈正相关。情景2用户成本最低, 因其高功率充电桩缩短了服务时间; 而情景4虽租赁成本高, 但用户成本较情景1降低30%, 表明其通过移动车提升了服务效率。

(3) 系统性能指标。所有情景的 W_s 均随到达率增加呈非线性上升, 但高功率配置(如情景2、5、8)的上升斜率更平缓, 说明其应对高负载能力更强; 混合配置情景(如情景3、6)在中等到达率(20~30 辆/小时)下队列长度最短, 表明资源分配均衡性更优。

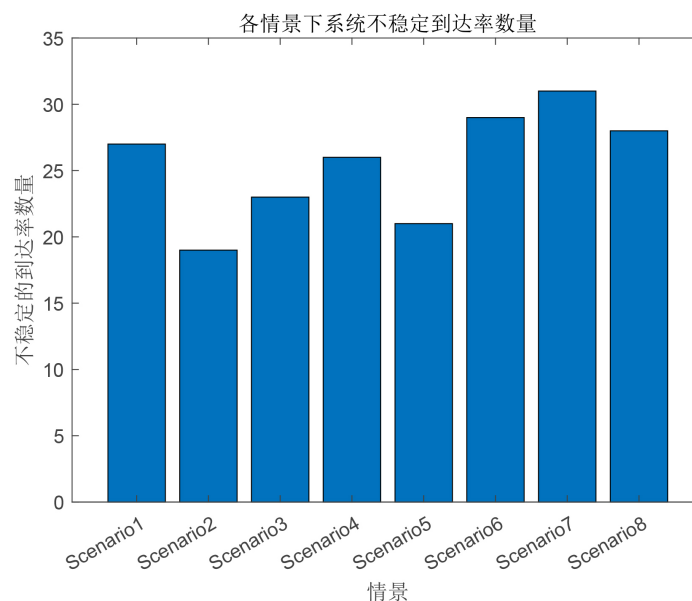


Figure 7. The number of different arrival rates in each scenario

图7. 各情境下不稳定到达率数量

图7 通过对各情景下系统不稳定到达率数量的对比分析, 得出以下发现:

(1) 系统稳定性与固定桩功率的强相关性。纯固定桩配置中, 高功率固定桩显著提升稳定性, 情景2的不稳定到达率数量为5, 远低于情景1。这表明, 固定桩功率是系统容量的核心决定因素, 高功率桩通过缩短单车辆服务时间(W_s), 直接提升单位时间内的服务能力; 低功率固定桩易成瓶颈, 情景1在到达率 > 25 辆/小时时即崩溃, 无法应对中等以上负荷需求。

(2) 极端配置的对比启示。最优稳定性配置, 情景8(0个不稳定到达率)通过“高功率固定桩 + 异质移动车”组合, 实现了全情景最高稳定性, 表明高功率固定桩是稳定性的基石, 移动车则用于消除剩余瓶颈; 最差稳定性配置, 情景1(25个不稳定到达率)因仅依赖低功率固定桩, 暴露了单一低效配置的脆弱性, 需通过混合策略规避。

4. 结论

本研究通过仿真分析了八种充电桩配置情景(Scenario1~Scenario8)在不同车辆到达率下的系统性能

与成本效益。综合图 1 至图 7 的量化结果, 得出以下主要结论:

(1) 系统性能与稳定性

系统稳定性与固定桩功率的强相关性: 固定桩功率是系统容量的核心决定因素, 高功率桩通过缩短单车辆服务时间(W_s), 直接提升单位时间内的服务能力; 低功率固定桩易成瓶颈无法应对中等以上负荷需求; 移动充电车的稳定性增益效应: 移动车通过动态扩展容量, 可有效填补固定桩的功率缺口; 移动车与高功率固定桩协同可逼近最优稳定性。

(2) 成本效益权衡

用户成本驱动因素, 用户总成本与系统时间(W_s)呈强正相关; 移动车配置的经济性矛盾, 移动车虽提升稳定性, 但显著增加租赁成本, 高功率固定桩与移动车的协同可部分抵消成本压力。

(3) 混合配置的优化潜力

异质资源均衡分配, 混合配置在成本与稳定性间实现折中; 低功率移动车的补充价值, 150kW 移动车在中等负荷下可替代部分 750kW 移动车功能, 说明差异化功率组合可优化资源利用率。

(4) 关键设计启示

优先部署高功率固定桩: 160kW 固定桩是降低用户成本与提升稳定性的基础, 建议其在总配置中占比 $\geq 50\%$; 动态调度移动充电车, 在高峰时段引入 750kW 移动车(如 Scenario5), 常态需求下采用“750kW + 150kW”混合配置(如 Scenario6), 以平衡成本与容量需求; 规避低效单点依赖, 纯低功率固定桩配置(Scenario1)存在严重稳定性风险, 需通过移动车或混合功率设计规避。

(5) 本研究的不足及未来研究方向

本研究量化了充电桩配置对系统性能与经济性的影响, 揭示了“功率 - 稳定性 - 成本”三者间的复杂耦合关系。研究结果为充电站规划提供了多目标优化框架, 未来可进一步探索动态调度算法与实时需求预测的结合, 以实现资源配置的精细化控制。本文就实际应用价值而言, 现有模型尚未纳入运营维护的动态要素, 包括充电桩故障率的随机性、移动充电车调度路径优化、用户充电等待耐心值等现实约束。未来工作需建立混合整数规划模型, 将设备维护成本、车辆调度能耗、用户流失概率等运营指标纳入目标函数, 结合强化学习方法构建动态决策系统。在用户行为建模中引入前景理论, 量化充电等待焦虑对排队决策的影响, 并开发数字孪生平台进行多智能体仿真验证, 从而提升研究成果的工程应用价值。

参考文献

- [1] 张玥, 方世南. 数字生态文明建设的重大意义、现实困境与实践进路[J/OL]. 学术探索, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1148.c.20241212.1325.006.html>, 2025-01-09.
- [2] 2024 年我国新能源汽车产销量均超 1200 万辆[Z/OL]. 新华社. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202501/content_6998270.htm, 2025-01-13.
- [3] 吴恒飞. 高速公路电动汽车充电站布局研究——以 G15 (沈海高速)江苏省段为例[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [4] 杨晓光, 胡仕星月, 张梦雅. 智能高速公路交通应用技术发展综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 142-164.
- [5] 蔡子龙, 王品, 宋建, 等. 电动汽车公共应急充电站选址规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 62-68.
- [6] 刘丽军, 陈昌, 胡鑫, 等. 基于“车-路-站-网”信息耦合的电动汽车有序充电策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 693-703.
- [7] 杨杰庆, 姜晓雪, 赵克全. 高速公路充电站选址定容问题的多目标优化方法(英文) [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 11-21.
- [8] 杨健维, 李爱, 廖凯. 城际高速路网中光储充电站的定容规划[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 934-943.
- [9] 杨扬, 张天雨, 朱宇婷, 等. 考虑建设时序和动态需求的城际公路充电设施优化布局[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(7): 1163-1177+1219.

- [10] 叶志豪. 移动式 and 固定式协同的共享电动汽车充电规划方法[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [11] 张维戈, 陈连福, 黄戩, 等. M/G/K 排队模型在电动出租汽车充电站排队系统中的应用[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 724-729.
- [12] 钟超, 万君, 许程鹏, 等. 高速公路可移动集装箱式充电站运营调配模式优化[J]. 农村电气化, 2023(7): 22-27.
- [13] 平均充电时长可缩短 25% [EB/OL]. <https://www.sipac.gov.cn/szgyyq/mtjj/202410/b4d9514fe47b4630aa42906cac6b6744.shtml>, 2024-10-02.