

## 面向智能交通场景的V2V充电服务优化研究综述

张珂扬<sup>1</sup>, 刘朔晗<sup>2,3</sup>, 曹越<sup>1</sup>, 林海<sup>1</sup>, 康嘉文<sup>4</sup>, 艾浩军<sup>1</sup>

(1. 武汉大学国家网络安全学院, 湖北 武汉 430073; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省计算中心(国家超级计算济南中心), 算力互联网与信息安全教育部重点实验室, 山东 济南 250013; 3. 山东省计算机网络重点实验室, 山东省基础科学研究中心(计算机科学), 山东 济南 250013; 4. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**近年来, 电动汽车(EV, electric vehicle)行业蓬勃发展, 而充电基础设施在布局、结构、运营等方面存在缺陷, 成为阻碍市场扩张的重要原因。相关政策已将车联网(IoV, Internet of vehicles)、车网互动、分布式储能等充电设施与智慧能源领域的前沿科技创新列入发展要点。鉴于传统的电网-车(G2V, grid to vehicle)充电模式难以在有限的充电基础设施条件下满足大规模并行的EV充电需求, 现有的能源消费结构亟须适应需求的动态变化。在此背景下, 车-车(V2V, vehicle to vehicle)充电概念的提出缓解了G2V充电模式在时间、空间域的限制, 从而充分发挥EV作为移动性分布式储能单元的潜能, 使用户能源需求得到灵活补给, 为智能交通场景中的充电服务优化提供崭新的思路, 助力未来智能交通系统(ITS, intelligent transportation system)的发展。关注了以V2V充电为核心的优化方向, 对近年来的相关研究进行了梳理。首先, 针对智能交通场景中的电动汽车充电服务进行分类, 并对V2V充电模式进行整体概述; 其次, 从技术侧重角度对各项研究中提出的V2V充电管理方案进行分类, 详细阐述优化策略; 最后, 通过展望V2V充电模式的发展前景, 就未来研究的开放主题进行探讨。

**关键词:** 电动汽车; 车-车; 智能交通系统; 充电服务优化; 充电管理

**中图分类号:** TM73; TK01

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00450

## A review on optimization of V2V charging services in intelligent transportation environment

ZHANG Keyang<sup>1</sup>, LIU Shuohan<sup>2,3</sup>, CAO Yue<sup>1</sup>, LIN Hai<sup>1</sup>, KANG Jiawen<sup>4</sup>, AI Haojun<sup>1</sup>

1. School of Cyber Science and Engineering, Wuhan University, Wuhan 430073, China

2. Key Laboratory of Computing Power Network and Information Security, Ministry of Education, Shandong Computer Science Center (National Supercomputer Center in Jinan), Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250013, China

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Computer Networks, Shandong Fundamental Research Center for Computer Science, Jinan 250013, China

4. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** In recent years, the electric vehicle (EV) industry has seen vigorous growth. However, deficiencies in charging infrastructure layout, structure and operation have become obstacles to further market expansion. Thus, relevant policies have listed the Internet of vehicles (IoV), vehicle-grid bidirectional interaction, distributed energy storage, and other charging facilities alongside cutting-edge technological innovations in the smart energy sector as key development priorities. Since traditional grid to vehicle (G2V) charging model struggles to meet the large-scale parallel charging demands of

收稿日期: 2024-10-16; 修回日期: 2024-11-30

通信作者: 曹越, yue.cao@whu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFE0139300); 湖北省科技人才服务企业项目 (No. 2024DJC068); 武汉市重点研发计划项目 (No. 2024050702030136)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFE0139300), the Hubei Province Technology Service and Enterprise Program (No. 2024DJC068), the Wuhan Key Research and Development Program (No. 2024050702030136)

EVs under limited charging infrastructure conditions, the existing structure of energy consumption needs to adapt to the dynamic changes in demand. Against this backdrop, the concept of vehicle to vehicle (V2V) charging has been proposed to alleviate the limitations of G2V charging mode in terms of time and space domains, exploiting the potential of smart EVs as mobile distributed energy storage units. This facilitates flexible energy supply, offering a new approach to optimizing EV charging services and supporting the development of future intelligent transportation system (ITS). Focusing on the optimization direction centered around V2V charging, the relevant researches in recent years were reviewed. Firstly, the charging services in the intelligent transportation scenarios were classified, and an overview of the V2V charging mode was provided. Then, the proposed V2V charging management schemes from a technical emphasis perspective were categorized, and the optimization strategies were elaborated in detail. Finally, the development prospects of V2V charging in ITS were explored, and open research topics for future studies were discussed.

**Key words:** EV, V2V, ITS, charging service optimization, charging management

## 0 引言

近年来,受到人类活动影响,全球气候变暖加剧,极端天气事件频发,生态环境平衡和人类健康面临着严重的危害,进而对社会经济施加了巨大的压力。传统燃油车排放的温室气体是全球变暖的主因之一,化石燃料的燃烧致使碳排放量增加,碳循环失衡。对此,以车载电源驱动的电动汽车(EV, electric vehicle)因有利于降低对化石燃料的依赖,减少温室气体排放,增加能源转换效率等<sup>[1]</sup>,被广泛认为是燃油车的最佳替代选择。现今,国际社会对减排、落实气候行动等呼声彻耳,各国已出台相关政策鼓励民众使用清洁能源车辆。鉴于政策支持以及EV在成本、驾驶体验、环境友好等方面的优势,其市场迅速扩张。2022年至2023年,全球EV交付量达1 050万辆,较2021年增长55%,中国市场销量同比增长82%<sup>[2]</sup>,在新车销售中占比从5%升至14%,初现未来取代燃油车成为主要交通工具的端倪。

据《关于进一步构建高质量充电基础设施体系的指导意见》(以下简称“《意见》”),我国充电基础设施规模虽列全球之首,但存在“布局不够完善、结构不够合理、服务不够均衡、运营不够规范”等问题,亟须科学布局、规范化管理和技术革新。《意见》强调科技创新对充电系统软硬件协同升级的关键引领作用,即硬件层面攻关动力电池难题,性能优化,推动智能化设施研发应用;软件层面设计车-车、车-网互动架构,构建能源需求预测模型,实现宏观聚合调控。中国信息通信研究院发布的《车联网白皮书》阐明了新能源汽车与智能化网联化技术的深度融合,将使其在能源、交通、信

息等多层次网络体系整合中扮演枢纽角色,即智能网联汽车作为交通载体、信息感知传输节点和能源流动存储单元的价值亟待挖掘和释放。

在此背景下,电网-车(G2V, grid to vehicle)与车-电网(V2G, vehicle to grid)研究已涵盖硬件技术、充放电策略、能源管理、通信机制、价格体系等方面。然而,随着EV数量与充电需求的激增,G2V服务受限于充电基础设施的问题愈加突出(时间、空间域上存在局限性),易引发充电拥塞、电网高负荷、需求覆盖困难等问题,急需开创性的优化思路打破传统服务模式限制。物联网技术在交通领域的应用愈发广泛,特别是助力智能交通系统(ITS, intelligent transportation system)发展。智能交通场景构成如图1所示,ITS由智能网联汽车、路侧单元(RSU, road side unit)、服务平台3个部分组成,支持智能交通网络中EV、充电设施、用户终端、中心服务器、RSU等实体进行无线通信与信息交互<sup>[3]</sup>,实现车、路和人三方协同,赋能EV多样化系统服务(自适应导航、道路安全服务、智能充电等)及交通信息分析处理等信息化能力<sup>[4]</sup>。车-车(V2V, vehicle to vehicle)充电的概念由此衍生,该模式下,具备插电式双向充电接口<sup>[5]</sup>的智能网联EV间可实时通信交互,共享物理位置、充放电需求、能源价格等信息,在EV间建立供给-需求关系,通过点对点(P2P, point to point)电能传输实现EV间能源共享。V2V充电利用EV作为移动分布式储能单元的优势,突破了传统充电模式的时空域限制,允许于任意时间、地点进行充放电操作,为现有充电系统提供新的模式选项,并为智能交通场景中的充电服务优化提供崭新的思路。

作为新兴服务优化方向,V2V充电尚处于起步

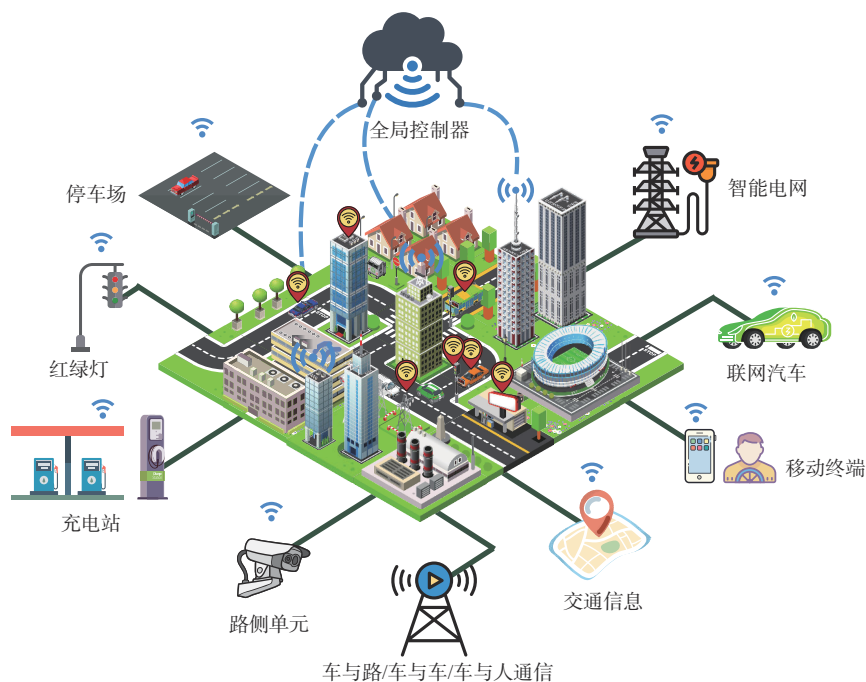


图1 智能交通场景构成

阶段，本文聚焦以V2V充电为核心的充电服务优化方向，梳理近年来相关研究，首先，介绍智能交通场景中的充电服务，分类为固定式、移动式和无接触式充电；其次，概述V2V充电模式，及V2V充电挑战与技术理论；随后，从技术侧重角度分类研究提出的V2V充电管理方案并详述优化策略；最后，展望V2V充电模式的发展前景，就未来研究的开放主题进行探讨。

## 1 传统充电场景分类及研究

在探讨V2V模式前，本节将传统充电场景划分为3类，固定式充电、无接触式充电、移动式充电如图2所示：以G2V与V2G模式为代表的固定式充电、以电池更换模式为代表的无接触式充电、以两类移动充电站（MCS, mobile charging station）为代表的移动式充电，3类充电场景对比总结见表1。

### 1.1 固定式充电

现实应用中最普及的充电模式是以固定充电站（FCS, fixed charging station）为设施的G2V模式，其输入端为电网或本地能源生成，输出端为FCS配备的充电桩。公共FCS数量配合充电需求稳步上升，截至2022年年底，全球已有270万处公共FCS，约30%为当年新增<sup>[5]</sup>，同时车主开始选择在住宅处

安装低功率级别的私人充电桩。G2V模式下，EV出现能源需求时前往FCS连接充电桩，将电网中的交流电（AC, alternating current）转换为直流电（DC, direct current）以补能。充电桩支持双向功率流，附加组件可实现功率因数修正、隔离和谐波抑制<sup>[6]</sup>。G2V相关研究问题包括功率控制、FCS选址、电网调控、充电调度等，如文献[7]从城市规划者的角度，利用Voronoi图和粒子群优化算法提出了FCS的最优选址框架。

与日俱增的EV对电力系统产生了影响，体现在用电高峰时段的高负荷、非均匀负载特性、电压稳定、电力质量等方面。为此，研究开始探索G2V的优化或替代方案。文献[8]提及V2G概念早在1995年就由Amory Lovins提出，扩展了EV向电网回馈电能的交互、整合形式，即EV不仅作为能源负载系统通过G2V从电网处补能，其过剩储能还可在闲置时经由智能调度返还。Evoke<sup>[9]</sup>的研究涉及双向充电器与相应控制系统的工作原理，并展示了电网对EV随机充/放电行为的响应管控。通过与智能电网整合，EV可遵循计划调整充放电时段与功率，发挥其作为移动分布式储能单元与可控负荷的灵活调节能力，为电网提供辅助服务，如峰值负荷转移、频率响应、电压调节、负载/发电跟踪、备转容量等，提升电网的可靠性、稳定性和效率<sup>[10]</sup>。

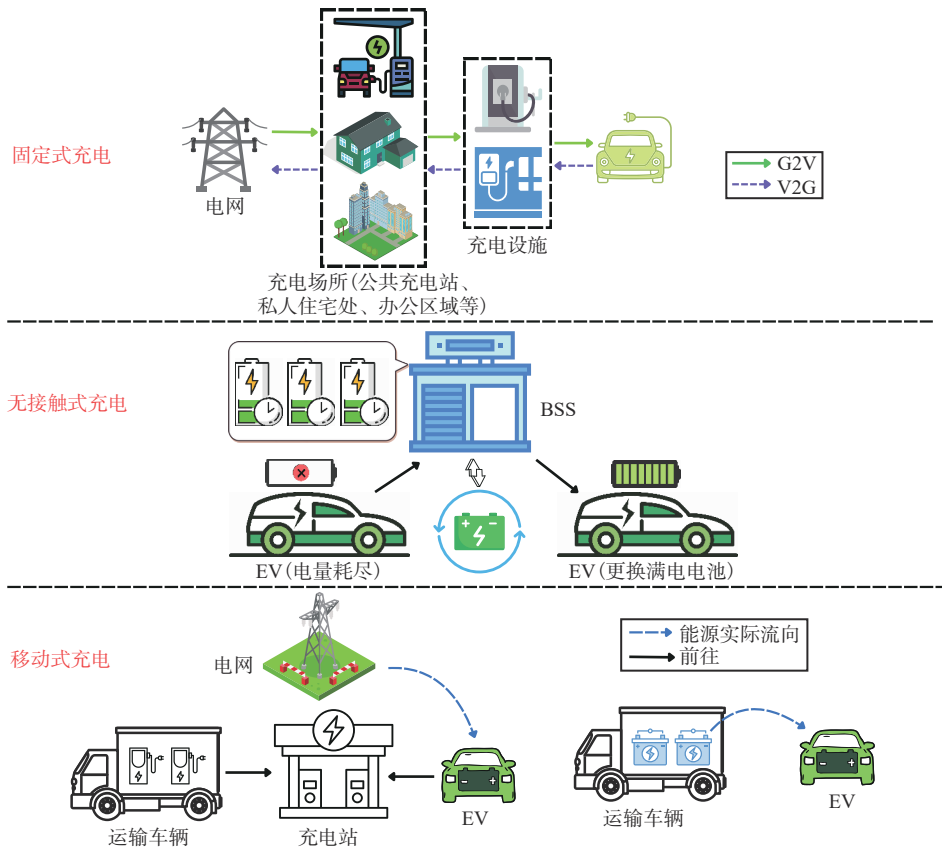


表1 3类充电场景对比总结

分类	优点	缺点
固定式充电	FCS 数量最多,应用最广;稳定可靠;高效;无能源容量限制;	缺乏时空灵活性;区域分布不平衡;设施巨额投资;需延展/改造允许长时间充电
无接触式充电	耗时最短;运营方集中管理,延长电池寿命,维护电网稳定;用户无须关心电池衰减成本;有利于电池回收	社会接受障碍;BSS 仅为品牌私有,数量少;难以实现跨品牌兼容;高投资;BSS 内可供电池数量限制
移动式充电	时空灵活性;减少前往充电位置耗时;能;设施投资少;有利于应急救援;缓解电网负载;提高FCS 利用效率	携带能源容量有限;充电速率低;需设计充电导航系统;电池的异质性

### 1.2 无接触式充电

G2V 模式采用受功率限制的插拔式充电,耗时相比燃油车加油仍较长。无接触式充电可缩减这一时间差距,“无接触”表明EV与电源间并不存在有线物理直连(区分EV定点接入的插拔式充电),而是借助特殊设施实现近似有线充电过程的效果。电池更换服务是此类型的代表应用, EV可在电池更换站(BSS, battery swapping station)内迅速拆卸电量耗尽的电池并更换站内维护的满电电池,全程控制在1~3 min,与加油耗时相媲美<sup>[11]</sup>。此模式无须用户调整驾驶习惯,且免去了对私人充电设施的投资和电池寿命的顾虑。替换的电池后续交由BSS运

营方集中管理,统一协调安排充电次序及时段,控制充电功率,承担电池维护、降解等成本。这有助于延长电池寿命、回收利用,缓解个体的无序性充电行为,从而维护电网稳定。至2025年年底,蔚来计划在全国建成5 000余处BSS<sup>[12]</sup>,但品牌间EV车型、电池规格、接口等标准差异导致的换电兼容性问题使BSS的商业化运营短期内难以实现。再者,电池共享模式改变了传统车辆所有权观念,因电池成为受第三方管理、共享、流动的非私有部件,或影响社会对换电服务的接受度。此场景中,研究重点包括BSS选址优化、电池充电规划、BSS商业运营、换电调度等。以Li等<sup>[13]</sup>提出的换电服务

框架为例，平衡了用户的充电满意度与运营方的电池退化<sup>[14]</sup>成本。通过预约机制优化调度算法，实现满足双侧需求的最优BSS选择。

### 1.3 移动式充电

第1.1节阐述的固定式充电受限于充电基础设施，缺乏时空域的灵活性。由于投资成本高昂、土地使用、电网容量限制等因素，FCS数量相对有限，且受市场需求和EV动态密度影响，区域间分布不均，难以覆盖如城市郊区、高速路段等需求分散的区域（密集部署不具成本效益）。受此约束，过长的行程、等待时间或请求遭拒会导致用户满意度下降，仅依赖基础设施的建设难以解决充电问题。为此，支持在任意时间、地点提供服务的移动式充电应运而生<sup>[15]</sup>，其实现依托携带MCS的高机动性运输车辆。MCS形式包括能源存储系统（如蓄电池）与接入区域电力系统的类充电桩设施，即为FCS提供更多接入点。前者能实现时空域的灵活部署，但能源储量有限；后者可视作FCS服务能力的扩展，此时运输车辆的移动供能路径规划仅需考虑FCS分布。MCS的临时部署有助于规划者评估区域内潜在充电需求，为优化FCS布局提供参考。相关研究问题包括MCS路径规划、最优部署、调度与交易机制等，文献[16]将MCS分配问题归为冲突装箱问题的变体，并提出启发式求解算法。

基于EV的分布式储能与移动特性，文献[17]将V2V充电归入移动式充电范畴，但本文会区分二者。移动式充电需要构建集中式运营框架（商业模式与投资回报评估有别于V2V运营），涉及MCS周期性维护（类似G2V运维）与车队规模、能源容量等规划。核心挑战为服务区域内的供需平衡，以优化MCS能源分配与利用效率。而V2V模式的优化核心在于供需方匹配与服务位置选择，这与MCS调度优化在问题建模上就不同（对象、约束、目标）。MCS调度更类似路径规划问题，解决方案可归纳为充电导航系统的设计，MCS运输车辆须在合理的时间窗口内完成多项任务，而V2V灵活性更高，无严格路径约束。此外，移动充电的供电主体明确，无V2V运营存在的用户参与激励问题。V2V概念将在第2节中详细阐释。

## 2 V2V充电概述

本节对V2V充电模式进行了整体概述，主要

介绍了V2V充电的基本概念、分类、面临挑战和技术理论。

### 2.1 V2V充电基本概念

尽管G2V模式在能源转化效率、功率、控制、智能化技术等方面有所进展，但仍面临着成本高昂、数量欠缺、分布受限、电网负荷过重等问题。为此，强调EV间互联的“V2V”概念应运而生，提供了一种创新的能源共享方案<sup>[6]</sup>。V2V充电依托物联网技术构建的能源共享网络，由EV担任能源提供者（EV-P, electric vehicle-provider），为能源消费者（EV-C, electric vehicle-consumer）供能，实现基于有线传输的V2V充电模式。Sousa等<sup>[18]</sup>提出的车载DC-DC双向转换器实现了EV间直流传输，避免了G2V模式中前端AC-DC和后端DC-DC的4次能源转换，有效地提升了传输效率。为增强V2V充电作为传统模式的替代或补充优化方案的效能，集中式V2V充电管理方案会配置全局控制器（GC, global controller），负责实时整合、处理网络中能源分配、EV充放电请求、物理位置、设施使用情况、交通状况等信息。引入GC有助于能源共享网络的宏观调控，如安排EV-C与EV-P配对、分配潜在过剩能源、协调管理能源交易等决策，进而优化全局服务。

V2V充电模式重新定义了能源分配的动态范式，并在智能交通场景中展现出高度适应性与变革潜力。依托EV作为移动分布式储能单元的能力，V2V模式突破了传统充电在时空域上的约束。时间域上，EV-C无须等待FCS点位，而是直接匹配EV-P，经匹配协商缩减行程耗时；空间域上，充电位置选项拓展至城市停车场（PL, parking lot）或电能存储站（PSS, power storage station）等配备V2V设施的任意场所。V2V设施的部署成本远低于FCS，若EV配套携带车载双向转换器，则部署成本近似于零。V2V模式能在避免电网扩容、降低设施规划和管理难度的情况下广泛布点，扩大充电服务的覆盖范围。研究证实了此模式在智能交通场景中的实际应用价值，如Khele等<sup>[19]</sup>的方案（整合V2G与V2V）相较V2G-G2V方案，用户成本在住宅与购物中心场景中分别减少了9.17%与12.58%。

学界对V2V充电的日益关注源于表1所列的各充电模式的诸多局限，如2023年国际能源署发布的《The global EV outlook》指出，纵使全球FCS部署数量显著增长，仍难与EV总量的增长曲线相

匹配<sup>[5]</sup>。而影响社会对EV接受程度、利好评判和市场预期的，正是充电设施建设、法规完善程度、技术研发创新等因素。“充电设施建设”强调充电网络结构优化与区域间服务衔接，旨在减轻EV车主的续航焦虑。其源于需求超出设施的服务承载能力（或区域间分布不均），加之EV续航里程有限，用户产生无法抵达行程终点的担忧。“法规完善程度”可展开为EV购置补贴、设施运维、安全规范等偏供应侧的政策制定。“技术研发创新”是推动V2V实际应用的关键，涵盖充电效率、控制策略、硬件性能、标准等方面。硬件层面，双向转换器的发展支持EV角色在EV-C与EV-P间切换，将过剩能源反馈至电网或与其他EV共享，以缓解全局充电压力，并从能源交易中获取经济回报（利用时段电价的峰谷价差获利<sup>[20]</sup>）。软件层面，系统决策和全局充电流程控制已成为优化V2V充电与用户体验的关键议题。此外，如何通过差异化定价策略和商业模式激励EV车主参与亟待探索。总体而言，V2V模式的应用利于降低充电成本，优化能源利用效率，缓解电力系统负载，推动能源供给模式转型。随着V2V充电技术的成熟，将通过分布式能源管理，实现高效、灵活和低成本能源调度，助力智能化绿色低碳交通转型。

### 2.2 V2V 充电模式分类

V2V 充电模式可分为同步 V2V 充电和异步

V2V 充电<sup>[10]</sup>，同步 V2V、异步 V2V 如图 3 所示。

#### 1) 同步 V2V 充电（一对一/多对一）

当前研究多聚焦于一对一同步 V2V 充电，此模式强制要求 EV-C 与 EV-P 同时位于充电位置，借助车载或非车载双向转换器实现静态 P2P 能源交互。在充电目标完成或预设停留时间截止前，双方均需维持连接状态。若未特意申明，本文列举的相关研究文献均基于此模式。关注多对一同步 V2V 充电的研究有限，其借助聚合器网络实现多源供电 EV-P 与多点充电 EV-C 间的直流连接（从多源 EV-P 均匀提取电能供给 EV-C）。现实场景中，EV-P 可能希望保障剩余电量宽裕以应对潜在需求变化，或遇紧急情况需即刻停止供电。多源供电避免了 EV-P 的非计划性离开对 EV-C 造成的影响，如文献[21]设计的多对一 V2V 模型，任意时刻仅一个电源会连接到支流总线，达到供电量阈值后由聚合器主动切换至后续电源（聚合器在传输过程中负责 V2V 调解，控制各源 EV-P 的放电平衡）。该文献探讨的充电过程具有串行特征，未来升级聚合器技术后有望实现并行多对一，甚至并行多对多（视作多对一的功能扩展，非独立模式）的充电配置。此模式的优化策略应区别于一对一模式，因 GC 在响应需求、安排 V2V 匹配与调度等流程时待处理信息量将呈指数级增长，对系统算力提出更高要求。此外，能源定价机制更为烦琐，是依据单次充电服务

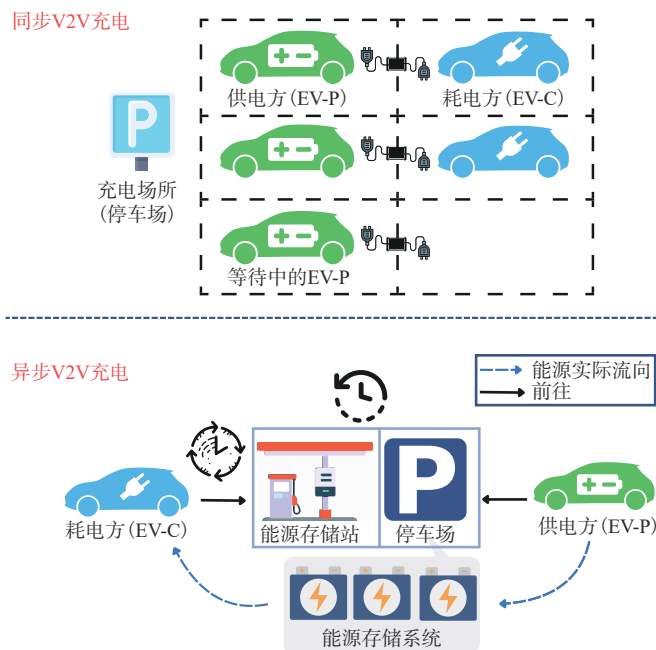


图3 同步V2V、异步V2V

决定，效仿G2V模式的时段电价或采用双向拍卖思想有待商榷（事实上，无论面向何种V2V模式，构建多方公平、积极参与的P2P商业模式均任重而道远）。对此，可行思路是设计专门的多对一V2V充电管理方案，或通过优化算法将多对一充电问题归约为一对一问题处理。

### 2) 异步V2V充电

异步V2V充电摆脱了EV-C与EV-P同时出现在充电位置进行能源交互的时空同步约束。此模式下，EV-P先行前往指定放电位置，将电能传输至如PSS储能设施处暂存。EV-C随后前往相应PSS补能，这节省了同步模式下等待匹配EV对象到达的时间。此外，异步的优势还体现在储能设施支持“预取”，即EV-C可在储能存量充足时先行获取能源，后续再由EV-P补充，这进一步放宽了时间域限制。异步模式利用储能设施作为能源中转，理论上可通过EV的协调调度实现多对一的串行能源传输，且EV-P不必配合EV-C需求预设或调整供电量，而是优先考虑自身的电量阈值和偏好，在灵活性和自由度方面优于同步。其缺点在于能源常以交流电形式存储，异步传输需要经过4次功率转换阶段（类似V2G-G2V，放电时DC-DC、DC-AC转换，充电时逆向AC-DC、DC-DC转换<sup>[18]</sup>），在能源传输损耗方面高于同步（车载DC形式）的两次转换，转换阶段亦是V2V充电的硬件挑战。若储能不足，PSS提供的充电位或将长时间被分配的V2V对所占用，直至完成充放电服务才会释放，引入预约机制或本地发电设施（太阳能、风能），或可缓解此问题。

## 2.3 V2V充电研究的宏观挑战与技术理论

V2V模式能否引领充电领域的范式转换取决于研究能否解决一系列的宏观挑战。这些挑战促使着研究者持续探索，以期实现理论与实际的协调统一。

### 1) V2V配对与充电服务位置选择

文献普遍将V2V充电过程划分为两个阶段：V2V匹配和路径规划（即充电位置选择）。研究多立足于规划层面进行优化，其主题围绕策略开发以实现EV间的高效配对，常见要求为满足EV充电需求的同时降低充电成本。此外，研究还涉及最优充电位置选择和用户隐私保护方案等方面。因能源交易、成本、用户意愿等维度众多，且牵扯EV、

充电设施运维，甚至城市交通部门等多方利益，V2V配对与充电服务位置选择成为优化服务过程中最为核心的挑战。

### 2) 移动能源补给数量与充电速率限制

V2V模式下，EV作为分布式储能单元可携带的能源受电池容量制约。因此，设计V2V充电管理方案时需特别关注服务时间窗口和能源约束，通过优化调度最大化有限能源储备的价值。纵使V2V充电的时空域灵活性节省了行驶和等待充电服务的时间，但充电速率远低于当前主流的G2V模式。类似于续航焦虑，充电耗时同样是影响车主评判充电服务的重要因素（部分车主倾向于以更高代价换取更快的服务）。对此，硬件设施升级，提升充电速率并控制成本稳定将是推动V2V被广泛接受的关键。

### 3) 用户参与度的促进与加强

V2V充电面临EV-P与EV-C数量不平衡的挑战，尤其以低EV分布密度区域为甚，EV-P数量严重欠缺<sup>[22]</sup>。纵使EV-P能从能源交易中获利，不代表车主有意愿主动提供放电服务，因其将承担较高的时间成本（行程与放电的时间开销），且车主可能担忧放电对EV电池的潜在损耗（电池退化）与安全隐私问题。其中，电池退化可建模为依赖于吞吐量的循环退化，以及温度、时间等因素导致的电池活性/非活性组件的日历退化<sup>[14]</sup>。多项研究<sup>[23-29]</sup>将其视为补充优化点纳入了充电成本（非成本主体），因电池的生产、维护成本若按生命周期均摊至时间轴上，对整体经济性的影响有限（相较时间、交易成本）。回归当前挑战，解决方案主要从经济学角度出发，商业模式设计与政策激励有助于激发市场需求，吸引出租车、网约车等特定群体参与能源共享，确保EV-P基数。此外，政府可与企业合作进行市场推广，建立社群，推动可持续的V2V充电生态系统的构建。

### 4) 用户的行为预测模型分析

EV充电行为虽表面上随机且无序，实则与个体的行为模式和驾驶习惯高度相关。例如，工作日用户多沿住宅至工作场所的固定路线往返，通勤时间、时段基本浮动于一定范围内。文献[30]基于燃油车的加油行为类推EV充电行为，发现约3/4的驾驶员倾向于在行程开始/接近结束时加油，形成共性规律，EV用户同样希望避免充电所致的行程中断。然而，建立全面、精准的用户行为预测模型并

整合至管理系统与优化算法中具有挑战性，且涉及隐私保护问题。

诸多文献聚焦于V2V充电场景中能源共享方案的设计与优化，围绕缓解续航焦虑、改善电网负载、降低充电成本、经济获利等各异目的提出了一众优化算法与模型框架，其实现依托图论<sup>[31]</sup>、规划论<sup>[32]</sup>、博弈论<sup>[33]</sup>、拍卖论等支撑性的技术理论。

图论作为组合数学的分支，以有向/无向图与网络结构为研究核心。在智能交通场景中，个体间交互的信息流拓扑结构与关系可抽象为图，其顶点代表交通、能源网络实体（如GC、EV-C、EV-P），边用于描述实体间的特定关系（如供需配对）与制约，权重则衡量关系强度。代数图论的引入助力分布式V2V系统，实现对多独立对象的协调控制，解决V2V最优匹配、稳定匹配、路径选择等问题。

规划论作为运筹学的分支，实际应用价值极高，面向智能交通领域，研究者借助其“最优化问题”求解的突出优势构建多样规划模型，拟解决V2V充电流程中需求行为预测、供需匹配、充电位置选择、调度优化等系列问题。规划论的引入能为V2V充电系统中亟待解决的实时智能决策与优化挑战提供有效方案。问题建模时需要综合考虑预设EV电量阈值、交易价格、设施分布等约束条件，并遵循特定的评估指标（目标函数），设计精确或近似求解算法。最终，以真实数据仿真动态调度、优化决策制定等流程，管理场景实体，验证方案可行性。

博弈论和拍卖论的引入旨在解决V2V充电中用户参与激励、交易定价策略、全局竞争性均衡等问题。博弈论解析激励结构间的相互作用，而“V2V”概念注定了能源共享网络中EV间存在交互。通过综合考量EV间的利益平衡与系统整体优化，博弈论为分析各参与方的策略互动（通信、匹配、交易等环节均涉及决策过程）与最优寻解提供

了理论支撑。以代表“竞争性现象”的能源交易为例，在依据成本与支付预期制定价格策略时，各方均有自身利益诉求，需通过预测分析他方行为做出理性且能最大化收益的决策。拍卖论则从经济学角度指导V2V方案中拍卖形式的交易机制设计，通过拍卖满足EV用户的期望收益，提升资源分配效率，核心在解决“用户参与度的促进与加强”的挑战。

上述技术理论为解决宏观挑战，优化V2V场景中供需匹配、资源分配、交易、调度等实际应用流程提供了方法论与思路，进而为第3节中各V2V管理方案的具体技术方法实现提供了理论支撑。

### 3 V2V充电管理方案

面向智能交通场景，V2V充电优化的关键在于实现高效的充电需求响应、协调充电调度、组织分配潜在能源、提升用户体验质量（QoE, quality of experience）、降低充电成本等。第2.3节探讨了V2V充电的支撑性技术理论，为现有研究中的V2V充电管理方案的具体技术方法的实现、应用奠定了基础。本节将系统性梳理各方案，并从技术层面分类为：基于二分图匹配、线性规划、拍卖机制、博弈模型、路径规划与自定义规则的V2V充电管理方案。

#### 3.1 基于二分图匹配的V2V充电方案

在集中式V2V充电管理方案中，GC依据收集、整合的信息进行决策，控制V2V匹配及后续流程。在协调EV充放电时需综合考虑时空分布、预计等待时间、区域电价、旅行成本、电池退化等多维因素。为简化匹配问题，部分研究基于代数图论，将EV-C、EV-P等参与方视作二分图<sup>[34]</sup>中互斥独立集的顶点，核心在于定义、求解最大匹配、极大加权（参照维度确定权重）匹配、稳定匹配、完美匹配等不同类型的二分图匹配问题。基于二分图匹配的V2V充电方案见表2。

表2 基于二分图匹配的V2V充电方案

年份	文献	技术方法	模式	服务优化目标
2019	[30]	二分图最大匹配、稳定匹配	V2V、G2V	最大化系统效益；提高车主满意度
2017、2018	[23]、[24]	二分图极大加权匹配、稳定匹配	V2V	最大化网络社会福祉；以EV-C/EV-P为导向的最优稳定匹配，满足个体理性
2020	[25]	HBG匹配	V2V、G2V	优化V2V间交易式能源交互
2021	[26]	双层匹配： Gale-Shapley 稳定匹配，用户满意度匹配	V2V	优化EV-C成本、EV-P利润，提高用户满意度、系统的能源效率和网络社会福祉

Bulut等<sup>[30]</sup>设计的V2V充电共享系统通过集中式服务器收集时空分布状态及行驶路线等信息，进而匹配供需方。为模拟自然充电行为和用户意愿，研究者开发了基于行程的概率充电行为模型，其中，充电决策受时间表和续航阈值影响。系统核心为基于二分图最大匹配的协调机制与算法设计，按照最大化服务总量、峰值时段电网负荷缓解和最小化绕行成本的优先级目标顺序寻求最优协调配对，以优化整体系统效率。为平衡EV-C与EV-P的偏好差异，如EV-C希望降低绕行成本，EV-P倾向于单次出售更多能源，研究者参照稳定婚姻匹配（Gale-Shapley）<sup>[35]</sup>算法思想提出了以个体满意度为导向的稳定匹配算法。仿真结果显示峰值时段电网功率减少了35%~55%，系统的充电请求承载量增至2.2倍。

Zhang等<sup>[23-24]</sup>提出的合作型V2V能源管理协议允许EV在ITS的支持下实时向数据控制中心提交个体信息与交易请求，中心统合EV、FCS、PL等实体信息后应用选定匹配算法辅助全局决策。V2V匹配流程为：1) 依据EV信息构建无向加权二分图，边权定义为连接供需双方的总效用（纳入时间成本、旅行能源消耗、交易价格和电池退化成本）；2) 中心应用基于Kuhn-Munkres定理和匈牙利算法设计的极大权V2V（非稳定）匹配算法，通过迭代扩充匹配集合，直至供需双方实现完美匹配以最大化社会效益（EV总效用）。现实中EV个体存在交易偏好，忽视个体理性可能破坏交易市场的稳定性，为此作者还提出了基于EV-C/EV-P偏好的稳定匹配算法，其逻辑与Gale-Shapley算法一致，兼具对社会福祉的优化。文献中设计的匹配算法遵循“合作”原则，旨在达成EV-C与EV-P双赢的能源交易局面。

Zeng等<sup>[25]</sup>提出的分层二分图（HBG, hierarchical bi-partite graph）匹配方法将配电系统划分为若干个子系统，再由聚合器控制调度V2V与风力发电（WG, wind power generation）的能源交互。其中，EV-C与EV-P/WG间的交互被定义为“低层”；GC负责的相邻子系统及其与电网间的功率协调属于“高层”。各层通过基于Kuhn-Munkres定理和匈牙利算法的迭代匹配优化各层的能源交互过程，其目标包括最小化充电成本（能源交易与电池退化成本），最大化放电收益（EV-P/WG/电网），以及保障功率剩余/缺失在子系统间的平衡。HBG方法通

过促进交易性质的V2V交互，确保参与方以积极、可扩展和经济效益最优的方式实现能源共享。

Shurrab等<sup>[26]</sup>提出了一种基于现实模型的V2V充电优化框架，由中央控制平台根据信息和约束匹配EV，分配潜在过剩能源。该框架将V2V能源共享建模为双侧偏好匹配问题，采用双层V2V匹配求解。第一层基于Gale-Shapley算法生成稳定匹配，第二层利用设计的用户满意度模型优化匹配。双侧偏好的评估维度涵盖总时间成本（参照美联邦最低工资）、交易价格（EV-P定价）和电池退化成本。基于此，平台生成EV-C/EV-P偏好列表并配对，随后依据实际匹配对象的排名计算满意度，若双方互为列表首选，即可达成EV-C最低成本与EV-P最高利润的最优组合。仿真证实了该方案在优化了成本的同时兼顾了系统效率、用户满意度和社会福祉。

综上，基于二分图匹配的V2V充电方案的核心在于优化V2V匹配过程，以实现降低充放电成本、满足用户偏好、提高系统效益等目标。V2V充电这类多供应-需求方匹配依赖于GC提前获知各实体信息（身份、位置、需求、行程等），进而遵循特定准则优化匹配。目前，匹配标准暂未统一，故各侧（EV、电网、FCS运营方等）成本模型的设计存在分歧，涉及维度、参数缺乏共识，如时间成本、能源交易成本、损耗（传输损耗、退化成本）等。文献[30]就未考虑频繁充放电行为导致的电池退化<sup>[4]</sup>；文献[23]在能源交易价格制定时采用恒定电价；文献[26]则将定价权交予EV-P。此等匹配标准间差异或导致全局信息缺失，削弱系统协调与管理效率。集中式充电管理的缺陷如下：1) 缺乏隐私保护，EV用户向GC提交行程等敏感数据（匹配决策用）易暴露住址、工作、习惯等个人信息；2) 全局信息整合会加重数据传输负荷（引发网络拥塞），集中式管理要求极高的系统算力，需求高峰时段的计算开销庞大，目前面向实际工程应用的匹配优化研究尚匮乏；3) GC意味着数据资源的高度集中性，对其的干扰（如单点故障、恶意节点攻击）相较分布式更易影响全局充电服务稳定。

### 3.2 基于线性规划的V2V充电方案

鉴于线性规划（LP, linear programming）是最基础的规划论技巧，部分文献将V2V充电管理制定为LP问题，涉及线性约束条件下寻求目标函数的最优解。基于线性规划的V2V充电方案见表3。

表3 基于线性规划的V2V充电方案

年份	文献	技术方法	模式	服务优化目标
2016、2019	[36]、[37]	MIP	V2V(同步+异步)、G2V	最大化EV满意度;降低总充电成本
2021	[38]	ILP	V2V	最大化充电卡车提供服务数量
2014、2015	[27]、[28]	MILP	V2V、G2V	最小化智能充电站内社会成本
2018	[39]	MIP	V2V、G2V	最小化EV-C充电成本,克服续航焦虑及FCS有限的问题

Koufakis等<sup>[36]</sup>将充电调度建模为混合整数规划(MIP, mixed integer programming)问题,使用CPLEX 12.6.2求解。该文献提出了3种离线优化策略(预知调度信息)以解决最优EV充电调度问题,分别适用于:1)仅同步V2V充电;2)引入电网供电;3)引入电网和储能系统。假设驻留在FCS的EV可充当临时储能单元,目标函数要求最大化满足需求的EV数量与能源交易数量之差,约束条件涵盖能量水平更新、时刻最大交易数和EV参与。仿真证实了额外储能设施(EV)的引入可提升能源利用效率和车主满意度。后续研究<sup>[37]</sup>在此基础上引入了能源传输效率,丰富了电能来源,优化了EV调度算法以适应在线(实时信息)场景,还提出了“虚拟需求”概念,潜在过剩能源将被虚拟存储,以降低在线场景中V2V充电未知性带来的额外成本。

在Kabir等<sup>[38]</sup>设计的V2V商业模式中,服务商通过中央代理调遣搭载蓄电池或快速充电器的卡车,响应充电请求并规划卡车前往PL提供V2V充电服务的路线及顺序。该组合问题建模为整数线性规划(ILP, integer linear programming),目标是最大化服务数量,约束条件包括车队规模、服务时间窗口、能源容量等。为简化复杂性,方案采用Dantzig-Wolfe分解将原NP难问题转换为主问题与定价问题。主问题(LP形式,障碍法解决)在初始化后计算对偶变量值,随后构建定价问题的成本缩减函数,生成新的可行解以最小化此函数(贪心),将其添加至主函数的可行解集合,持续迭代优化至收敛标准。经验证,该算法在性能、效率和计算时间方面均优于对比的启发式算法。

文献[27-28]关注智能充电站内支持G2V、V2V双模式的合作调度问题。研究提出了由站内协调器设置虚拟电价(基于实时交易价格动态调整)以引导EV充放电行为,EV嵌入的控制器则响应信号,自主优化策略。合作调度问题被建模为混合整数线性规划(MILP, mixed integer linear programming),

求解任务交予协调器。约束条件包括服务时间、EV能源和电网负荷,目标是最小化总社会成本(经济充电)与电池退化成本(避免因优化频繁充放电)。研究引入了对偶分解将原问题拆解为对应各EV调度的子问题,通过协调参数保障局部与全局最优的一致性,最终利用Benders分解获得最优调度策略。

Kim等<sup>[39]</sup>提出的分布式算法用于解决V2V与V2C(即G2V)的合作充电问题(制定为MIP),目标函数旨在最小化EV-C侧充电成本(含行程、时间和交易费用),由聚合器依据区域负载动态调整G2V能源价格。MIP问题的分布式求解算法源于双边匹配博弈思想,供需方通过明确定义的偏好关系相互评估,确定偏好列表后利用Gale-Shapley算法为EV-C与EV-P/FCS形成稳定的匹配。偏好规则如下:1)EV-C按时间与距离排序EV-P;2)公共FCS遵循先到先服务(FCFS, first come first serve)原则确定EV-C次序;3)私人EV-P根据距离与供能收益排序EV-C。仿真结果表明,协作策略在保障V2C与V2V模式效率的同时缓解了车主续航焦虑,提高了服务总量,优于单一充电模式。

上述基于线性规划的V2V充电方案侧重于服务协调、成本制定、调度优化等方面。然而,文献[36-37]在优化策略中偏重EV电量状态转移与电网负荷预测,未将EV纳入能源交易市场的角色,缺乏完善的成本模型、协商过程等交易细节。文献[27]局限于FCS内的静态EV交易,忽视了EV移动特性对协调充电的影响(如续航焦虑)。上述方案普遍忽略了移动EV的充电预约问题,而GC决策应具备前瞻性,以计算成本为代价预测短期需求,降低V2V充电的不确定性。此外,集中式充电系统难以适应现实环境中EV的动态加入与退出,其数量及请求的非线性增长趋势或将导致系统复杂性显著地提升,现有基于线性规划的集中式V2V充电方案难以有效地应对这类动态变化。

### 3.3 基于拍卖机制的V2V充电方案

V2V充电服务优化的关键之一在于激励用户或

EV供应商参与，拍卖理论指导的拍卖机制设计正是从经济学角度切入，通过货币激励使潜在参与者感知到V2V能源共享的经济/社会效益，从而提升参与意愿。V2V能源交易是典型的多买家-多卖家交易问题，解决思路常采用双边拍卖（DA, double auction）机制，也有研究考虑正向/逆向拍卖机制以优化交易效率与资源分配，基于拍卖机制的V2V充电方案见表4。

Xu等<sup>[22]</sup>设计的V2V能源交易平台采用DA机制，以PL为拍卖场所，30 min为交易清算周期，流程为：1) EV-C与EV-P根据（偏好价格、能源数量等）交易周期属性向平台提供预留出价/要价；2) 平台按买方出价降序、卖方要价升序排序，并结合提交顺序生成价格曲线，交点定为交易清算点；3) 筛选接受范围内的V2V匹配，若无则回归G2V模式；4) 最终交易价格由 $k$ 因子规则确定， $k$ 因子可理解为买/卖方的权重（反映市场偏向），经调整能够平衡参与者的经济利润。基于英国社区PL的EV数据，案例分析证实了该方案在提升经济利益与降低电网能耗等方面的有效性。

Yassine和Hossain<sup>[40]</sup>提出了一种基于车联网的V2V交互系统的双边拍卖匹配算法（DAMA, double auction matching algorithm），旨在最大化社会效益与V2V能源交易量。该算法允许参与者自主制定竞标策略，流程为：1) 系统收集注册EV位置、请求等信息，求解全局最优V2V匹配问题（买方效用最大化、卖方成本最小化），各EV根据成本函数（能源、旅行成本）与匹配结果确定最优出价；2) EV-C/EV-P广播最佳出价/询价，附带接受的行驶范围；3) 算法升序排列出价，降序排列询价，循环配对至确定所有出价-询价对。DAMA会筛选可行方案，并根据价格与最大能量传输选择最具竞争力的出价-询价组合。研究证明了该算法可在多项式时间内完成最优匹配、支付至能源分配一系列流程，且保障个体收益非负。

借助区块链技术保障交易的安全、透明、防篡

改和可靠性，Houda等<sup>[41]</sup>提出的去中心化V2V能源交易系统可应对集中式模型中易诱发系统崩溃的单点故障。为实现公平且竞争性的能源市场，系统采用逆向拍卖（单买方与多卖方参与竞标，有别于传统“拍卖”，最低竞标价获胜）机制，先由认证EV-C发起拍卖，指定需求量、竞标时间和起始价。再由EV-P通过智能合约（SC, smart contract）竞标，最低出价者中标。系统在拍卖成功后锁定金额，生成访问令牌用于身份验证，能源交付后SC会转移资金。以太坊测试网络Ropsten验证了该系统的灵活性、适用性、低成本和高度安全性。

Yuan等<sup>[42]</sup>将异步V2V充电与本地发电机选作FCS替代能源，以维持应急需求响应（EDR, emergency demand response）期间的能源稳定供应，既能维护电网稳定性，还可规避电网暂时性失效风险。研究者将EDR期间的在线（需求、EDR能源上限等预先未知）EV充电调度问题制定为非线性混合整数规划。为激励EV-P参与优化市场，避免EV-P直接定价偏离实际，研究设计了拍卖机制以捕捉实时供需动态，流程为：1) FCS汇总能源需求与EDR信号；2) 启动拍卖，邀请EV-P提交竞标；3) FCS通知获胜EV-P，并决定是否从电网或本地发电机处提取能源。因此，FCS的成本计算会涵盖拍卖价格、电网成本、燃料成本、运维开支等。实证表明，该研究提出的EVCDR算法能节省近80%的成本（相较无拍卖），且执行效率高。

V2V能源交易的激励机制通常基于实时电价（ToU, time of use）或辅助服务奖励，允许EV车主通过调整能源储备与交易策略（如“低买高卖”）获利，补偿参与V2V充电的损耗与成本。基于拍卖机制的V2V充电方案赋予用户更高的自主性，使其通过竞标策略获取可观收益。然而，在保证合理定价的前提下实现公平交易仍具挑战，如文献[22]的DA机制虽能避免市场垄断，却难以应对市场操纵、虚假报价等恶意行为。文献[40-41]均未采取措施防止拍卖成交价格偏离市场均价，或未协调控制

表4

基于拍卖机制的V2V充电方案

年份	文献	技术方法	模式	服务优化目标
2021	[22]	双向拍卖	V2V、G2V	提高参与者的经济利益,缓解电网负载压力
2023	[40]	DAMA	V2V	最大化参与者效用(个体)及交易量(全局)
2021	[41]	逆向拍卖,区块链	V2V	实现去中心化、公平、透明、低成本和竞争性的V2V能源交易
2021	[42]	EVCDR	V2V(异步)、G2V	最小化长期累积的社会成本(来自EV、电网和本地发电机)

能源买卖价差（有损于市场公平）。对此，建议引入动态调节机制，参照供需分布与市场波动自适应调整，或设置价格阈值确保公平、与EV贡献相称的经济回报。除公平问题，拍卖平台在处理大规模交易时面临着匹配需求-报价的高计算开销；拍卖的隐私保护薄弱；预设交易周期限制V2V充电灵活性等挑战。拍卖流程复杂，用户操作烦琐，且买/卖方缺乏估值信息，亦不具备最优竞标策略相关专业知 识，这些问题将限制此类V2V方案的实际推广。

### 3.4 基于博弈模型的V2V充电方案

在V2V充电领域，部分研究利用博弈论作为理论工具，研究激励结构相互作用，分析EV-C与EV-P间的交互行为与能源交易策略，进而建立可实际应用的博弈模型以探索符合双方利益的最优充电方案，以期激励用户参与V2V能源共享并维持参与状态。基于博弈论的V2V充电方案见表5。

Yu等<sup>[43]</sup>针对EV接入电网/微电网（MG, micro grid）带来的额外负载与V2V系统中用户响应度低的问题，提出了一项基于Bayesian博弈（不完全信息博弈，EV接入时电量状态（SoC, state of charge）与行程安排等随机）的多方能源交易模型。通过风力、光伏发电的MG位于模型上层、MG区域内的聚合器与EV位于下层，共涉及车-微电网（V2M, vehicle to micro grid）、微电网-车（M2V, micro grid to vehicle）、微电网-微电网（M2M, micro grid to micro grid）和V2V这4种交易形式。模型采用非合作博弈，MG和EV作为理性玩家受需求与利益驱动独立决策，高度依赖对他人类型的预测（服从概率分布），研究证实了纳什均衡的唯一性。针对用户响应度低，模型引入用户对交易评估的满意度函数，以量化整体满意度。该文沿用了文献[47]的思路，即提出基于Bayesian博弈的最优定价策略，由SoC概率性评估EV交易角色（EV-C/EV-P）以计算期望效用。

Wang等<sup>[44]</sup>提出了一项基于价格控制的V2V能

源交互策略（优化问题制定为时间耦合的混合整数非线性规划），旨在鼓励具有过剩能源的EV参与能源共享，该研究在文献[48-49]的框架基础上纳入了时空协调。系统中，聚合器负责管理V2V充电，依据EV与智能电网信息动态调整、广播能源价格。EV则基于广播价格、续航焦虑和充放电成本收益决策。价格控制策略被建模为寡头博弈<sup>[50]</sup>：高需求情境下，EV-P可被视作供应寡头与电网博弈竞争，最终电价为二者供给的加权平均值；高供给情境下，EV-C垄断交易市场，电价由需求侧决定。该双重市场结构的定价机制基于线性价格函数，充分利用博弈模型的对称性，遵循市场规律，通过竞争性互动达到均衡。

Ye等<sup>[45]</sup>提出的基于Stackelberg博弈（两阶段完全信息动态博弈）的激励模型旨在解决EV用户自私行为，引导其认识V2V能源交易的环境、社会和经济益处，经历从抵触至积极参与的阶段性转变。模型中，EV-P先作为领导者定价，EV-C再作为追随者根据该定价决策，出售过剩能源。优化目标是最大化交易双方总利润（需求量与相对购电价加价的乘积，假设需求随价格线性递减）。通过对交易双方利润函数（凸函数）求导、计算零解、代入后求导等系列数学操作，模型能确定二者的最优收益。仿真表明，经领导者与追随者间定价的不断往复与决策调整，该模型能最大化买卖双方回报，且存在唯一的纳什均衡。

Anoh等<sup>[46]</sup>在虚拟微电网中应用博弈论优化能源交易策略，建立的Stackelberg博弈模型适用于非协调P2P能源交易（涵盖V2V充电）。该模型中生产者（供能方）追求效用最大化（满足本地负载需求与出售过剩能源所得收益），消费者则追求最小化交易成本，包括本地能源生产、购买、传输等成本及发电的碳排放惩罚。与文献[45]类似，模型基于Stackelberg博弈，但文献[46]中生产者处于主导地位，而消费者为追随者，即生产者先计算效用函数以确定最优出售能源量并公布意愿，消费者再依

表5 基于博弈论的V2V充电方案

年份	文献	技术方法	模式	服务优化目标
2023	[43]	Bayesian 博弈	V2V、V2G、G2V	提高参与用户的满意度,最大化绿色能源利用,满足低碳要求
2016	[44]	寡头博弈	V2V、V2G	激励用户参与能源交易,实现最优能源利用与个体利益
2020	[45]	Stackelberg 博弈	V2V	解决用户的自私行为,激励其参与V2V交易
2019	[46]	Stackelberg 博弈	P2P	最大化生产者效用,最小化消费者成本

据其决策计算最优支付价格并回应。此类双向博弈结构中，双方目标皆是最大化自身利益，但领导者始终会响应追随者行为，促使博弈收敛至唯一的Stackelberg均衡。

基于博弈论的V2V充电方案存在的问题主要围绕能源交易，如文献[44]的框架实现依赖的聚合器仅支持有限EV交易，维护成本高且单点故障会导致交易系统崩溃。在规划EV前往充电位置路线时采用的最短路径算法亦难以适配复杂动态的现实交通场景。此外，用户对敏感信息泄露、责任界定、非法访问、系统安全漏洞等方面存在顾虑。文献[45]的方案就未考虑交易过程中的安全隐私保护，缺乏身份验证、博弈匿名处理、交易消息传递的加密签名等措施。对此，分布式边缘服务器的采用，联邦学习与区块链的结合（核心为分布式架构）和数据可视化应用均能保护V2V交易<sup>[6]</sup>。最后，尽管博弈论的引入能实现个体间收益均衡或用户侧利润增长，进而提高V2V能源交易参与度，但个体收益的提升可能于全局收益无益，方案应致力于个体与整体利益间求取平衡。

### 3.5 基于路径规划的V2V充电方案

路径规划为动态规划的应用（路径最优化问题），属于规划论范畴。因EV行驶轨迹与目标充电位置间的距离是V2V充电优化不可忽略的因素，方案应确保较短的行驶路程和时间，避免任一方过长时间等待匹配对象，还需要保障较少的资源浪费与较低的时延，进而提升全局V2V充电效率与QoE。基于路径规划的V2V充电方案见表6。

Li等<sup>[29]</sup>设计了一项基于车载随意移动网络（VANET, vehicular ad-hoc network）的通信框架。VANET是车载通信领域的主流研究范式，亦有部分研究探索蜂窝网络或新型数据传输方案。该框架实现了停车服务中心与移动EV间的实时信息交互，并提出行驶能源成本与充电愉悦度两个数学模型以优化V2V充电服务。前者根据EV的SoC限制确定移动范围（忽略通信时延造成的非必要移动能耗），估算选择路径成本（涉及距离、路段平均时速、阻力系数、传输系统效率等），效仿最短路径算法降

低成本。后者利用等待时间评估用户愉悦度，其取决于充电点位占用情况及预约队列。EV基于两模型计算总成本（引入电池退化），预约最优充电位置，后续的V2V配对遵循FCFS原则。仿真表明，该框架能够有效降低充电成本，提高能源交互效率以及优化移动EV的空间协调。

Li等<sup>[51]</sup>提出的半集中式充电导航框架结合了VANET与移动边缘计算（MEC, mobile edge computing），通信成本与计算开销均低于传统集中式框架，流程为：1) EV-C向MEC服务器请求PL占用信息，服务器返回本地最优PL导航决策；2) 服务器将该决策递交至导航控制中心（NCC, navigation control center）；3) NCC负责全局充电导航管理，通过二分图极大权匹配预约相同PL的EV-C/EV-P（考虑到达时间差、能量差等）。步骤1)中MEC通过基于长短期记忆网络的行驶时间预测模型（根据历史交通数据估算路段均速、信号灯等待时长）、CC-CV两段式充电时间模型与充电舒适度模型（等待时间与PL空闲率）确定最优PL。为在步骤3)中确定通往PL的最佳路径，NCC采用基于Q-learning的自适应路径选择算法，通过预测路线行驶时间与能耗，分时段迭代至Q值表收敛，构建适应动态交通环境的最优路径集合。

基于路径规划的V2V充电方案面临的问题集中在导航系统上。集中式导航虽从全局视角优化了EV路径选择与调度过程，但高昂的时间和计算开销，甚至系统部署本身就会增加V2V充电成本。同时，导航会降低V2V充电的灵活性，用户需遵循预设路径，可能与其驾驶偏好相悖。倘若用户拒绝分享行程计划致使导航所需的预定义信息缺失，加之EV能源状态与需求的不可预测性，文献[29-51]所提方案计算得到的最优决策将失去意义。上述问题反映出V2V应用对实时调度方案的迫切需求，但类似文献[37]的在线调度研究目前尚欠缺。回归研究，文献[29]遵循FCFS原则的匹配策略并非最优匹配，其车载通信框架在实际应用中将面临经济成本、系统性能、数据安全和ITS集成等挑战。

表6

基于路径规划的V2V充电方案

年份	文献	技术方法	模式	服务优化目标
2018	[29]	最低成本路径规划	V2V	最小化EV总充电成本
2019	[51]	基于Q-learning的自适应路径规划	V2V	实现高效V2V导航,降低路径选择的额外时间、能源开销,最大匹配数

### 3.6 基于自定义规则的 V2V 充电方案

除第 3.1 节至第 3.5 节的分类外，部分 V2V 充电管理方案基于自定义规则，基于自定义规则的 V2V 充电方案见表 7。

Yucel 等<sup>[52]</sup>针对 V2V 充电中的隐私保护、自私行为、集中式算法效率和动态场景的局限性，提出了一种在线分布式匹配算法，其利用双色互近邻 (BMNN, bi-chromatic mutual nearest neighbor) 计算隐藏用户位置。EV-C 通过 4G 技术或专用短程通信 (DSRC, dedicated short-range communication) 主动搜索附近 EV-P，供应方则以分布方式直接响应请求形成配对。此算法受 Gale-Shapley 匹配理论启发，但省略了文献[26, 30, 39]中形成 EV 偏好列表的步骤，归结为查找 BMNN。V2V 匹配流程为：EV-C 先调用 BNN (bi-chromatic nearest neighbor) 算法锁定潜在匹配对象，随后其最近邻 EV-P 调用 BNN 算法避免次优匹配，确认双方互为最近邻即匹配成功。经仿真，此算法能减少动态环境中用户匹配的平均等待时间，且规避了集中式匹配的隐私风险。

由于 PL 充电设施占用状态存在不确定性，难以预测潜在充电拥塞，Liu 等<sup>[53]</sup>引入了预约机制并设置停车时间约束以贴近现实。方案流程为：1) GC 监控 PL，接收 EV-C 请求并根据实时位置匹配 EV-P；2) GC 依次处理充电、等待和预约队列，预估各 PL 的最早可充电时间 (EACT, earliest available charging time)，旨在最小化平均等待时间；3) GC 通知最优 PL 选项，V2V 对发送预约 (含 EV ID、预计到达时间与充电时间)，以便 GC 预估潜在充电流量，避免将后续 V2V 对分配至潜在拥塞的 PL。文献[54]提出的管理方案利用城市中异构充电设施，通过需求转移有效地缓解了充电拥塞问题。该研究中运用层次分析法 (AHP, analytic hierarchy process) 为区域电价、EACT 与能源传输效率 3 个维度分配权重，选择 V2V 或 G2V 模式，协同优化充电成本与用户体验。

受 Facebook Places 等位置社交网络应用的启

发，Bulut 和 Kisacikoglu<sup>[55]</sup>提出了适用于城市场景的 V2V 充电系统。考虑注册 EV 的行程信息需要共享，而 GPS 定位跟踪或将引起车主的隐私顾虑，系统采取车主知情且自愿的签到机制替代被动信息收集。车主通过签到提交当前电量、行程、预计停留时间等信息，系统会在匹配充电需求的同时根据行程判断过剩电量，并赋予用户完全控制权。研究将 EV 匹配建模为网络最大流问题，通过 Ford-Fulkerson 算法求解，目标为最大化与能源供应节点 (FCS 或 EV-P) 匹配的 EV 数量。基于真实住宅-工作场所车辆流动数据的仿真发现，无须新增 FCS，应用设计的 V2V 充电系统能够提升城市对 EV 的承载能力。

上述研究存在缺陷，如文献[53]依据最短距离预设 V2V 配对，忽视了优化匹配过程的潜在效益。文献[55]将 EV 充电需求简化为随机均匀分布，未充分考量 EV 的时空分布、行为模式、续航焦虑等因素。文献[23, 29-55]等方案存在共性缺陷，即 EV 调度部分均未考虑时间约束，换言之，未在规划问题中纳入时间窗口约束。设定 V2V 服务的具体时限，充放电任务能得到规范化表示，并与需求分布、服务优先级、实时电网负载、EV-P 容量等因素紧密关联，进而在提升全局服务效率的同时降低供需双方的充电成本。

综上，研究者在设计 V2V 充电管理方案时，应综合考虑研究需求与场景特征：基于二分图匹配的方案利用图论分析充电网络中的潜在关系，关注 EV-C 与 EV-P 间需求-资源的合理匹配；基于线性规划的方案存在明确的目标函数与约束条件，制定系统性策略以优化需求响应、能源分配、位置选择、调度等流程，但其设计与求解复杂；基于拍卖机制与博弈论的方案侧重市场化 V2V 交易，注重买卖双方利益平衡与效率优化，以激励用户参与和交互；其余方案则聚焦系统内部协作，旨在优化系统整体效能及用户体验。尽管众方案的目标细节与技术方法各异，但本质上是趋同的，即提高各参与方

表 7 基于自定义规则的 V2V 充电方案

年份	文献	技术方法	模式	服务优化目标
2019	[52]	BMNN	V2V	保护用户在交易中的隐私,最小化前往交易位置的距离
2022	[53]	EACT, 预约机制	V2V	缓解续航焦虑,最小化充电等待时间,最大化完全充电次数
2023	[54]	EACT, 预约机制	V2V, G2V	通过模式选择优化充电成本与用户体验
2017	[55]	类社交网络应用	V2V, G2V	实现用户对 V2V 充电的完全控制,隐私保护

乃至系统整体的利益，优化V2V能源共享网络，推动其向可持续的交通生态系统转型。

## 4 V2V充电的未来发展趋势

### 4.1 与能源互联网相融合

能源互联网 (IoE, Internet of energy) 由诸多微型能源网络构成，具备传统电网的基础供电功能，并通过IoE公共平台实现分布式单元间的能源共享。除交通载体外，EV亦是移动分布式储能单元与可控负载，V2V充电与IoE融合灵感源自于此，V2V概念能增加IoE中能源转移的灵活性与选项。假设小型社区每栋住宅均配备光伏发电与储能系统，EV可在集中调度下从电网、各户家庭储能或其他EV处获取能源，借助“互联”概念提高资源利用效率。此外，“车网互动”概念强调了EV与电网间能量、信息流的双向互动，表明EV与能源共享对象亦存在多元关系。以V2G模式为例，EV能为电网提供峰值负荷转移及频率、电压调节等服务。依循该思路，未来有望目睹EV与住宅电力系统的融合，为住宅供电，紧急情况下作为备用电源，甚至支持城市电力系统。

### 4.2 充电模式的融合与发展

未来EV充电将融合V2V、G2V、V2G等模式。单一充电模式如G2V缺乏时空灵活性；V2V充电虽灵活，但其充电速率逊于G2V模式<sup>[56]</sup>；换电模式受限于兼容性与商业化推广难题；无线充电的高额部署、运维成本等缺陷皆昭示着模式间融合和互补的必然。异步V2V充电借助PSS储能设施暂存中转电能，倘若以电网为中转，则存储容量可视为近似无限，这与V2G-G2V模式高度兼容。随着软/硬件技术的协同升级，如硬件层面的电网接入技术发展、双向充放电设施升级与FCS部署成本降低（文献[57]设计的集成式变流器已具备驱动、V2G、G2V和V2V功能）；软件层面设计基于混合充电模式的系统架构，以便宏观层面的聚合调控，异步V2V充电有望向V2G-G2V模式演进。相较异步V2V，同步V2V仍是缓解电网压力、降低充电成本和实现高灵活性充电的辅助选择，进而优化全局充电。综上，充电模式经由融合取长补短，将在能源共享优化方面迈向更高的水平。

### 4.3 新型充电方式

代表性的新型充电方式为EV间的静态/准动态/

动态无线充电 (S/Q/DWC, stationary/quasi-dynamic/dynamic wireless charging)，源自无线能量传输技术 (WPT, wireless power transfer)，无须物理电缆连接，通过电感耦合、磁谐振耦合、电磁辐射等实现能量传输<sup>[58]</sup>。典型形式为嵌入路面的发射线圈与EV底盘的接收线圈（集成于EV电池系统）。Plugless Power公司率先为雪佛兰沃尔特等提供WPT套件，且不断扩展产品线；宝马i3、奔驰S550e、特斯拉Model S等车型也相继采用了无线充电技术<sup>[59]</sup>。其优势在于PL、道路基础设施甚至其他EV上皆能安装发射器；无论静态停放或动态行驶 (QWC对应缓慢行驶) 状态，EV均可进行无线充电；免除了有线充电固有的充电等待时间，续航焦虑亦得到了缓解。其局限性包括无线能源传输损失、线圈校准定位困难、传输范围限制、外界环境干扰等。

无线充电设施的成本效益受额定功率、线圈结构与材料、部署位置等因素影响。相较FCS，无线充电系统的初始投资与维护成本更高昂，DWC相较SWC在电力轨道铺设上的投资更多。但DWC能降低对EV电池容量的要求<sup>[60]</sup>（如尺寸、单位容量成本），进而优化电池性能，延长续航里程。此外，设施选址（涉及交通流量分析、配电系统耦合、DWC路径规划等）是S/Q/DWC和G2V模式面临的共同议题。从长远利益角度评估，随着EV市场规模的扩张，无线充电的长期回报具有更高的增值潜力 (QoE与经济性)。鉴于高昂的设施成本与技术尚未成熟，目前难以大规模商业化，仅在部分试点区域用作实验研究。

### 4.4 自动驾驶汽车的参与

自动驾驶汽车依靠传感器、雷达、AI等前沿技术，具备感知、理解与分析复杂道路环境的能力（智能控制系统负责信息处理与决策）。根据美国国家公路交通安全管理局的自动驾驶5个等级的分类标准，最高级别的自动驾驶可免去人为意志干预，在无人场景中自主完成启动至行驶决策的全流程。借助车联网技术，自动驾驶汽车可实时通信、共享信息（如交通拥塞、危险事故等），有效预防交通事故。车辆间还能协同路径规划与行驶安排，从而优化交通流量，提升交通效率。在车辆停放（无人）期间，能自主参与V2V、G2V或V2G服务，补能或供能，进而优化能源共享。结合第4.3节提及的DWC概念，即EV-C在动态行驶中以无线形式

接受EV-P的供能,自动驾驶模式时车辆能够精准控制行驶速率与路线规划的同步,稳定性远高于人类驾驶。

## 5 开放性研究主题

### 5.1 安全性、隐私与信任问题

V2V充电服务涉及多方交易,参与方提交的位置数据、行程信息、充/放电请求等包含了个体的敏感信息,因此通信环节亟待引入同态加密等强隐私保护手段。攻击者可能通过身份伪造发起模仿攻击、伪造传播虚假信息、重放历史数据或篡改合法消息,甚至利用拒绝服务(DoS, denial of service)攻击消耗系统资源,干扰V2V交易平台的请求处理<sup>[61]</sup>。对此,车载系统亟须搭载适配车联网环境的身份认证方案,同时研究者需要权衡安全策略部署带来的计算、通信成本和防护性能。除了交易,EV的电池管理系统(BMS, battery management system)作为控制充放电操作的组件,亦面临安全风险,攻击者或通过物理入侵通信链路,篡改或破坏各子系统间的特定数据,如注入恶意数据,致使控制器无法追踪并执行控制信号,干扰正常功能,亦或利用系统漏洞提升权限,接管BMS。只有从软件与硬件双层面实施综合防护对策,方能提高系统对外部恶意攻击的弹性<sup>[1]</sup>。

### 5.2 兼容性与标准化

标准化涉及充电协议、功率水平、通信协议、支付系统、充电设施规格等要素<sup>[6]</sup>。鉴于不同EV制造商在电池容量、电压水平、寿命周期、充电器规格等方面存在设计差异,V2V充电方案需具备兼容性,以适应并支持上述差异,兼容多样化的EV型号与充电需求<sup>[7]</sup>。为避免差异带来的能源损失、功率限制、加速电池衰减等负面影响,制定统一的V2V充电协议与技术标准至关重要。仅当标准化体系完善后,V2V充电的商业化才能同步推进,进而赢得社会信任与接受度。EV间通信是V2V充电的基础要素,因此,高效的通信协议与标准是协调、管理EV,实现车联网中实体“互联互通”的关键,其应支持大量实时数据处理。缺乏统一通信标准会阻碍制造商的EV产品交互,还会限制车联网互联设施(如RSU、智能交通设施)的兼容性。尽管我国主推的蜂窝车联网(C-V2X, cellular vehicle-to-everything)技术<sup>[62]</sup>在迭代性、可靠性、信号传输

迟滞性等方面优于DSRC,但全球V2V标准差异使国际化标准推进更为复杂困难,解决跨国技术互操作性障碍,实现V2V技术在全球同步落实道阻且长。

### 5.3 能源交易网络运营模式创新

本节聚焦V2V能源共享的商业模式,探讨V2V场景中引入第三方运营商的必要性。第三方将承担充电运营平台的管理职责,处理、协调注册用户的充放电请求,并作为代理维护FCS/PSS/PL,收取服务费为平台佣金,以构建盈利的商业模式。深入研究方向包括用户对运营商的接受度调研、V2V充电相关法规制定、用户隐私保护、引入第三方的成本效益评估等。另一模式是EV-C与EV-P自主协商,第三方平台仅提供通信与交易的安全性保障,虽能给予用户较高的自由度,但对系统整体优化无益。区块链的P2P特性为V2V交易系统提供了理想解决方案,该技术无须依赖可信第三方,利用智能合约确保交易安全可靠,同时降低EV-C与EV-P侧的成本<sup>[41]</sup>。诸多研究已提出了基于区块链的V2V能源交易系统,如Kim等<sup>[63]</sup>引入去中心化标识符(DID, decentralized identifier)与可验证凭证(VC, verifiable credential),将区块链技术用作用户认证与身份管理,而非主流设计思路中利用区块链存储交易记录,EV完成交易会向对象提交VC,以证实交易的合法性。

## 6 结束语

面向智能交通场景的发展需要,G2V等传统充电形式难以满足日益增长的需求,EV充电服务亟须优化。本文关注以V2V充电为核心的优化方向,梳理近年来相关的研究进展。首先,介绍传统智能交通场景中的充电服务,提出分类;其次,概述V2V充电模式,介绍V2V研究面临的挑战与技术理论;随后,从技术视角对现有V2V充电管理方案进行分类,详述优化策略;最后,展望V2V充电在未来智能交通系统中的发展前景,就未来研究的开放主题进行探讨。本文通过对当前V2V充电领域的全面概述与未来发展趋势的分析,希望可以促进V2V充电模式、框架设计等的深入研究,推动EV与能源领域的交叉研究,并对未来智能交通系统的设计与规划提供思路。分析认为,在政策驱动下,V2V充电作为充电服务优化的崭新思路,未

来势必会得到广泛的应用，成为EV生态系统不可或缺的一环。

### 参考文献：

- [1] ISLAM S, IQBAL A, MARZBAND M, et al. State-of-the-art vehicle-to-everything mode of operation of electric vehicles and its future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 166: 112574.
- [2] MOHAMED K, YASSER N, HALA E, et al. Electric vehicles in China, Europe, and the United States: current trend and market comparison[J]. *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability*, 2024, 2(1): 1-20.
- [3] 曹越, 吕臣臣, 孙娅苹, 等. 面向车联网环境的异常行为检测机制研究综述[J]. *信息安全学报*, 2023, 23(4): 10-19.  
CAO Y, LYU C C, SUN Y P, et al. Review of research on misbehavior detection in VANET[J]. *Netinfo Security*, 2023, 23(4): 10-19.
- [4] 江恺, 曹越, 周欢, 等. 车联网边缘智能: 概念、架构、问题、实施和展望[J]. *物联网学报*, 2023, 7(1): 37-48.  
JIANG K, CAO Y, ZHOU H, et al. Edge intelligence empowered Internet of vehicles: concept, framework, issues, implementation, and prospect[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2023, 7(1): 37-48.
- [5] PATIL G, PODE G, DIOUF B, et al. Sustainable decarbonization of road transport: policies, current status, and challenges of electric vehicles[J]. *Sustainability*, 2024, 16(18): 8058.
- [6] ALGHAWI M, MOUNSEF J. Overview of vehicle-to-vehicle energy sharing infrastructure[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 54567-54589.
- [7] ZHANG H C, HU Z C, XU Z W, et al. An integrated planning framework for different types of PEV charging facilities in urban area[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(5): 2273-2284.
- [8] LIU S G, YE Z X. Progress and prospect of electric vehicle's V2G technology[C]//*Proceedings of the 2019 6th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 412-416.
- [9] EVODE R. Modeling of electric grid behaviors having electric vehicle charging stations with G2V and V2G possibilities[C]//*Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [10] CAO Y, CUI J X, LIU S H, et al. A holistic review on E-mobility service optimization: challenges, recent progress, and future directions[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(2): 3712-3741.
- [11] KOCER M C, YURDAKUL O, ALBAYRAK S. Optimal scheduling of battery swapping stations for electric public transportation[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [12] QIAO Y. Economic benefit analysis of NIO battery-swap station based on regional service capacity model[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Economic Management and Model Engineering, ICEMME 2022, November 18-20, 2022, Nanjing, China*. EAI, 2023: 1-11.
- [13] LI X Y, CAO Y, YAN F, et al. Towards user-friendly energy supplement service considering battery degradation cost[J]. *Energy*, 2022, 249: 123716.
- [14] SCHWENK K, MEISENBACHER S, BRIEGEL B, et al. Integrating battery aging in the optimization for bidirectional charging of electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(6): 5135-5145.
- [15] AFSHAR S, MACEDO P, MOHAMED F, et al. A literature review on mobile charging station technology for electric vehicles[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1184-1190.
- [16] CHAUHAN V, GUPTA A. Scheduling mobile charging stations for electric vehicle charging[C]//*Proceedings of the 2018 14th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 131-136.
- [17] AFSHAR S, MACEDO P, MOHAMED F, et al. Mobile charging stations for electric vehicles: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 152: 111654.
- [18] SOUSA T J C, MONTEIRO V, APARÍCIO FERNANDES J C, et al. New perspectives for vehicle-to-vehicle (V2V) power transfer[C]//*Proceedings of the IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 5183-5188.
- [19] KHELE A, JIANG C C, WANG H. Fairness-aware optimization of vehicle-to-vehicle interaction for smart EV charging coordination[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE/IAS 59th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-9.
- [20] ALVARO-HERMANA R, FRAILE-ARDANUY J, ZUFIRIA P J, et al. Peer to peer energy trading with electric vehicles[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2016, 8(3): 33-44.
- [21] BADRI Y, SUDABATTULA S K, HUSSAIN I. Application of V2V energy sharing in electric vehicles with source switching[C]//*Proceedings of the 2022 International Virtual Conference on Power Engineering Computing and Control: Developments in Electric Vehicles and Energy Sector for Sustainable Future (PECCON)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [22] XU Y M, WANG S Q, LONG C. A vehicle-to-vehicle energy trading platform using double auction with high flexibility[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [23] ZHANG R Q, CHENG X, YANG L Q. Flexible energy management protocol for cooperative EV-to-EV charging[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(1): 172-184.

- [24] ZHANG R Q, CHENG X, YANG L Q. Stable matching based cooperative V2V charging mechanism for electric vehicles[C]//Proceedings of the 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [25] ZENG L, LI C B, LI Z Y, et al. Hierarchical bipartite graph matching method for transactive V2V power exchange in distribution power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 301-311.
- [26] SHURRAB M, SINGH S, OTROK H, et al. A stable matching game for V2V energy sharing-a user satisfaction framework[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 7601-7613.
- [27] YOU P C, YANG Z Y, CHOW M Y, et al. Optimal cooperative charging strategy for a smart charging station of electric vehicles[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1.
- [28] YOU P C, YANG Z Y. Efficient optimal scheduling of charging station with multiple electric vehicles via V2V[C]//Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Piscataway: IEEE Press, 2014: 716-721.
- [29] LI G Y, BOUKHATEM L, ZHAO L, et al. Direct vehicle-to-vehicle charging strategy in vehicular ad-hoc networks[C]//Proceedings of the 2018 9th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [30] BULUT E, KISACIKOGLU M C, AKKAYA K. Spatio-temporal non-intrusive direct V2V charge sharing coordination[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 9385-9398.
- [31] R.J.Wealson, 葛惠忠. 什么是图论?[J]. 世界科学, 1990(7): 5-7. WEALSON R, GE H Z. What is graph theory?[J]. World Science, 1990(7): 5-7.
- [32] 中国数学规划学科发展概述[J]. 运筹学学报, 2014,18(1):1-8. The mathematical programming branch of operations research society of China. An overview of mathematical programming research in China[J]. Operations Research Transactions, 2014, 18(1): 1-8.
- [33] KUHN H W. Classics in game theory[M]. Princeton: Princeton University Press, 1997.
- [34] MASCHLER M, ZAMIR S, SOLAN E. Game theory[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2020.
- [35] GUSFIELD D, IRVING R W. The stable marriage problem: structure and algorithms[M]. Cambridge, USA: MIT press, 1989.
- [36] KOUFAKIS A M, RIGAS E S, BASSILIADES N, et al. Towards an optimal EV charging scheduling scheme with V2G and V2V energy transfer[C]//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Piscataway: IEEE Press, 2016: 302-307.
- [37] KOUFAKIS A M, RIGAS E S, BASSILIADES N, et al. Offline and online electric vehicle charging scheduling with V2V energy transfer[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(5): 2128-2138.
- [38] KABIR M E, SORKHOH I, MOUSSA B, et al. Joint routing and scheduling of mobile charging infrastructure for V2V energy transfer[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2021, 6(4): 736-746.
- [39] KIM O T T, TRAN N H, NGUYEN V, et al. Cooperative between V2C and V2V charging: less range anxiety and more charged EVs[C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2018: 679-683.
- [40] YASSINE A, HOSSAIN M S. Match maximization of vehicle-to-vehicle energy charging with double-sided auction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(11): 13250-13259.
- [41] HOUDA Z A E, HAFID A S, KHOUKHI L. Blockchain-based reverse auction for V2V charging in smart grid environment[C]//Proceedings of the ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [42] YUAN Y L, JIAO L, ZHU K L, et al. Scheduling online EV charging demand response via V2V auctions and local generation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 11436-11452.
- [43] YU Y, LIU Y, FENG X, et al. V2V energy trading considering user satisfaction under low-carbon objectives via Bayesian game[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2023, 11(12): 15-35.
- [44] WANG M, ISMAIL M, ZHANG R, et al. Spatio-temporal coordinated V2V energy swapping strategy for mobile PEVs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1566-1579.
- [45] YE X Y, ZHANG Y Q, NI Y Y, et al. Motivational game-theoretic vehicle-to-vehicle energy trading in the smart grid[C]//Proceedings of the 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2020: 231-236.
- [46] ANOH K, MAHARJAN S, IKPEHAI A, et al. Energy peer-to-peer trading in virtual microgrids in smart grids: a game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1264-1275.
- [47] YU Y, LI G L, LIU Y, et al. V2V energy trading in residential microgrids considering multiple constraints via Bayesian game[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(6): 5946-5957.
- [48] ISMAIL M, SERPEDIN E, QARAQE K. Spatial and temporal online charging/discharging coordination for mobile PEVs[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(1): 112-121.
- [49] WANG M, LIANG H, ZHANG R, et al. Mobility-aware coordinated charging for electric vehicles in VANET-enhanced smart grid[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(7): 1344-1360.
- [50] FRIEDMAN J. Chapter 11 oligopoly theory[M]//Handbook of Mathematical Economics. Amsterdam: Elsevier, 1982: 491-534.
- [51] LI G Y, SUN Q, BOUKHATEM L, et al. Intelligent vehicle-to-vehicle charging navigation for mobile electric vehicles via VANET-

based communication[J]. IEEE Access, 2019, 7: 170888-170906.

- [52] YUCEL F, AKKAYA K, BULUT E. Efficient and privacy preserving supplier matching for electric vehicle charging[J]. Ad Hoc Networks, 2019, 90: 101730.
- [53] LIU S H, NI Q, CAO Y, et al. A reservation-based vehicle-to-vehicle charging service under constraint of parking duration[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(1): 176-187.
- [54] LIU S H, CAO Y, NI Q, et al. Towards reservation-based E-mobility service via hybrid of V2V and G2V charging modes[J]. Energy, 2023, 268: 126737.
- [55] BULUT E, KISACIKOGLU M C. Mitigating range anxiety via vehicle-to-vehicle social charging system[C]//Proceedings of the 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [56] CUI J X, LIU S H, CAO Y, et al. A hybrid electric vehicle energy supply system via direct and asynchronous V2V charging modes[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 2056-2061.
- [57] SHAH V, PAYAMI S. Integrated converter with G2V, V2G, and DC/V2V charging capabilities for switched reluctance motor drive-train based EV application[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(3): 3837-3850.
- [58] 牛权龙, 贾日恒, 李明禄. 移动无线可充电传感器网络中的充电路径优化[J]. 物联网学报, 2023, 7(4): 110-122.
- NIU Q L, JIA R H, LI M L. Charging path optimization in mobile wireless rechargeable sensor networks[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2023, 7(4): 110-122.
- [59] GABBAR H A. Fast charging and resilient transportation infrastructures in smart cities[M]. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [60] SHANMUGAM Y, NARAYANAMOORTHY R, VISHNURAM P, et al. A systematic review of dynamic wireless charging system for electric transportation[J]. IEEE Access, 2022, 10: 133617-133642.
- [61] 王曼竹, 李梓琦, 陈翌飞, 等. 车联网中安全认证技术的分析与研究[J]. 物联网学报, 2021, 5(3): 106-114.
- WANG M Z, LI Z Q, CHEN Y F, et al. Research and implementation of safety authentication technology in Internet of vehicles[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2021, 5(3): 106-114.
- [62] 陈山枝, 葛雨明, 时岩. 蜂窝车联网(C-V2X)技术发展、应用及展望[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 1-12.
- CHEN S Z, GE Y M, SHI Y. Technology development, application and prospect of cellular vehicle-to-everything(C-V2X)[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 1-12.
- [63] KIM M, LEE J, OH J, et al. Blockchain based energy trading scheme for vehicle-to-vehicle using decentralized identifiers[J]. Applied Energy, 2022, 322: 119445.

### [作者简介]



张珂扬(2002-), 男, 武汉大学国家网络安全学院在读, 主要研究方向为电动汽车充电服务优化、智能交通系统、网络安全等。



刘朔晗(1995-), 男, 博士, 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省计算中心(国家超级计算济南中心), 算力互联网与信息安全教育部重点实验室, 山东省计算机网络重点实验室, 山东省基础科学研究中心(计算机科学)研究员, 主要研究方向为智能交通系统、电动汽车充电服务系统优化等。



曹越(1984-), 男, 博士, 武汉大学国家网络安全学院教授、博士生导师, 主要研究方向为网络通信、网络安全、交通决策优化等。



林海(1976-), 男, 博士, 武汉大学国家网络安全学院副教授, 主要研究方向为计算机网络、物联网、网络安全等。



康嘉文(1989-), 男, 博士, 广东工业大学自动化学院教授, 主要研究方向为区块链、物联网、元宇宙等。



艾浩军(1972-), 男, 博士, 武汉大学国家网络安全学院副教授, 主要研究方向为普适计算、计算机视觉、无线感知等。