

面向规模化应用的车网互动：实践进展、关键瓶颈与发展路径

黄学良¹, 刘永东², 张梓麒³, 龚成明⁴, 高山¹, 姚涵议¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210018; 2. 中国电力企业联合会标准化中心, 北京市 100761;

3. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏省南京市 210023;

4. 南京德睿特来电能源研究院有限公司, 江苏省南京市 210012)

摘要: 大规模电动汽车在新型电力系统中的战略价值已获得广泛认可。车网互动作为交通与能源系统深度融合的关键纽带,其试点应用在全国范围内多点铺开,但规模化推广仍面临系统性瓶颈。文中首先立足交通能源融合视角,聚焦多元场景下车网互动支撑新型电力系统建设的核心特征,系统梳理典型试点工作的应用成效。然后,从规划、设备、平台、机制、用户和标准等维度,揭示规模化推广中的核心制约。最后,提出系统性创新架构并探讨大模型驱动的用户行为画像、交通-能源系统协同和数字孪生平台等前沿研究方向,展望车网互动远期图景并提出分阶段技术路径与政策建议,旨在为车网互动高质量、规模化发展提供理论支撑与实践指引。

关键词: 电动汽车; 车网互动; 新型电力系统; 试点; 规模化应用; 交通-能源系统协同; 数字孪生; 技术路径

0 引言

电动汽车(EV)作为实现交通领域双碳目标的核心载体,已进入规模化发展阶段。据公安部统计,截至2025年底,中国纯EV保有量达3 022万辆^[1]。到2030年,中国新能源汽车保有量将进一步攀升至1亿辆以上^[2]。这一庞大的移动储能集群为车网互动(V2G)技术从理论走向工程实践和规模化应用提供了坚实的物质基础。

V2G是EV与新型电力系统深度融合的关键纽带^[3]。通过有序充电、双向充放电等多元模式,利用需求响应、虚拟电厂等方法,一方面EV可作为灵活负荷参与电网削峰填谷,并提升配电网承载力^[4];另一方面,其储能属性可促进新能源消纳并提供调频、调压等辅助服务,提升新型电力系统的灵活性与韧性^[5]。

2023年以来,国家发改委等多部门连续出台《关于推动车网互动规模化应用试点工作的通知》等文件,为V2G工作提供了明确的方向^[6-8]。一系列试点示范在全国范围内多点开花,验证了V2G在技术、商业上的可行性,并在新能源本地消纳等方面取得了阶段性成效。然而,在快速发展的同时,V2G

实践仍面临诸多现实问题。用户、车企等参与主体响应积极性不足,市场与激励机制尚未健全,技术标准与接口协议的兼容性有待提升,且对新型电力系统的深层支撑价值缺乏系统量化评估。这些都制约了V2G从试点示范向规模化、实用化的跨越^[9]。

本文立足V2G实践工作,聚焦V2G从试点示范到规模化推广的核心命题,构建了交通-能源双视角下的V2G场景细分体系,评估了不同场景的互动潜力。首先,基于国内外示范项目完成了实践进展的对比分析,剖析了规模化推广的核心瓶颈。然后,提出了面向实用化的V2G创新架构,探讨了前沿技术应用方向。最后,提出面向亿辆级EV的V2G总愿景,并针对当前发展的阶段性特征,从政策、技术、市场等维度提出建议。本文旨在为V2G的可持续发展提供参考,助力构建技术成熟、市场高效、用户友好的V2G生态体系,服务于新型电力系统的建设与双碳目标的实现。

1 V2G场景细分与实践进展

1.1 面向新型电力系统的V2G核心价值与要求

新型电力系统是实现双碳目标的核心载体。为安全、经济地消纳可再生能源,需要推动电力与交通等领域的深度融合,促进跨系统资源优化配置,提升新型电力系统灵活性^[10]。V2G是衔接交通与能源系统的关键枢纽。面向新型电力系统,其核心价值是助力新能源多层次消纳与交通-能源协同降碳,通

收稿日期: 2025-09-30; 修回日期: 2026-06-08。

上网日期: 2026-06-17。

江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目:“分布式能源聚合优化与协调控制”(BE2022030-2)。

过资源复用降低能源转型的社会总成本,平衡“低碳、安全、经济”的不可能三角^[11]。

V2G利用EV的灵活负荷特性和动力电池的储能特性,在微网、配电网和主网等多层级形成多时间尺度灵活调节能力^[12],如图1所示。在微网层面,EV可存储分布式光伏的剩余电量,作为调节资源平抑局部负荷波动,通过局部优化调度提升并网容量的利用率^[13];在配电网层面,通过有序充放电优化负荷曲线,为电力电子化的有源配电网提供有功/无功支撑,并可参与谐波治理^[14];在主网层面,EV集群可参与调频、调峰等辅助服务,支撑跨区域新能源广域互济^[15]。从充电服务和新能源消纳角度,可以较低的增量投资,提升系统对大规模EV补能的支撑能力和对新能源的接纳能力。从碳减排角度,通过引导EV优先吸收可再生能源电力,能够降低EV使用环节的碳排放^[16];同时,利用EV作为移动储能资源可降低传统调峰机组的运行比例,间接减少碳排放。交通领域电动化与能源领域清洁化通过V2G形成闭环,实现全环节碳减排^[17]。

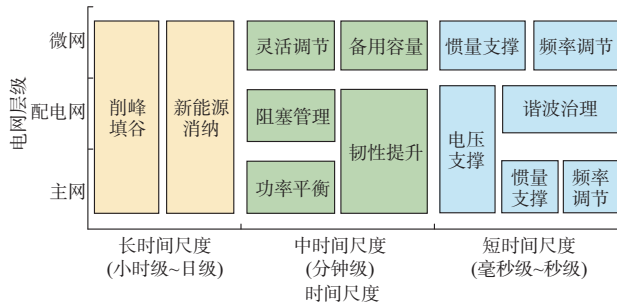


图1 V2G在新型电力系统中可发挥的作用

Fig.1 Roles that V2G can play in new power system

当前,EV已广泛应用于交通体系的多元场景,推动了V2G技术应用边界的持续拓展。V2G的具体实现方式与技术架构受车辆行驶和充电时间灵活性、电池容量裕度及车主参与意愿等多重因素影响,需要适配不同交通模式的异质性需求,才能符合EV与新型电力系统的融合逻辑^[18]。普通EV用户出行随机性高、行驶时间碎片化,平均停放时间占比大于90%^[19],尽管单体电耗较少、储能容量有限,但由于规模庞大,群体负荷转移和移动储能潜力高;公交等公共服务EV路线固定、停车时段集中,备班和低谷运行时段闲置较多^[20];出租/网约车等周转率高、充电周期短、充电等待意愿弱^[21];货运与特种作业场景则具有能耗高、单体容量大的特性^[22]。若忽视场景差异,设定单一的互动目标,将导致技术方案与实际需求的错配。交通与能源侧的共同作用,定义了V2G在新型电力系统中的功能边界,须改变以单一价值导向为目标的“一刀切”互动模式,转向场

景适配的差异化设计,在满足交通系统核心功能的前提下,实现V2G的精准落地与价值最大化。

1.2 V2G多元场景分析

规模化EV是V2G的底层物理载体,首先需考虑交通出行行为约束,方能响应新型电力系统的互动目标。然而,交通网与能源网在时间尺度与空间拓扑上存在显著的异质性。交通行为的特点表现为随机时空转移轨迹下的能量消耗,而能源系统的核心诉求则聚焦于刚性物理约束下固定节点的功率平衡。因此,本节从交通模式与能源融合方式两个正交维度对V2G场景进行细分,旨在揭示不同场景的核心特征及其适配的互动目标,为面向规模化EV的V2G方案精准落地提供支撑。

交通模式直接决定了V2G的参与边界与形态特征,不同模式的核心特点如下:

1)普通用户市内出行^[23]。充电需求主要分布于居民区、工作区及商业中心停车场等城市分散节点,用户主体为私人车主。出行半径有限,驻车时间长,但充电行为受生活作息、天气等因素影响,随机性和自主性强。

2)普通用户城际出行^[24]。充电需求集中于高速公路服务区或城际公路枢纽节点,用户主体为私人车主,单次出行距离长,对充电速度敏感,且充电需求与路网流量、节假日周期强相关。

3)城市公交。充电需求主要集中于公交枢纽和停车场等固定站点,公交公司可采用集中式调度管理。行驶路线固定、驻车时间可预测,车队规模稳定且电池规格统一。

4)出租/网约车。充电需求分散于城市公共充电站、路边快充点等节点,用户主体为租赁公司或个体司机,集中调度与分散决策管理模式兼具。日均行驶里程长,覆盖范围大,充电行为与接单间隙强相关,对充电效率要求高。

5)市内货运配送^[25]。充电需求集中于物流园区、配送中心等节点。用户主体为物流企业,采用集中式管理。行驶范围多在城市环线内,驻车时段固定、电池容量中等、充电需求稳定。

6)重型货运。充电需求分布于港口、矿山、高速公路服务区等节点,基于专业化车队运营。行驶距离长,能耗高且受载重量、道路特征影响显著,充电时间集中于装卸货间隙。重卡换电站电池容量大,充电及互动需要与车辆运营特性紧密配合。

能源融合方式的技术特性决定了V2G的物理边界,不同方式的核心特点如下^[26-30]:

1)分散式慢充。与低压配电网直连,设备类型多为额定功率 ≤ 11 kW的交流充电桩,额定功率 ≤ 20 kW的小功率直流充电桩或无线充电。

2)分散式快充。与低压配电网直连,设备类型多为50~150 kW直流充电桩。

3)集中式快充。通过专用变压器接入中低压配电网,配置50 kW以上直流充电桩或300 kW以上超级快充桩。多数站点配套储能系统,部分采用直流母线与充电堆构型,通过功率动态分配提升设备利用率。

4)光储充站。在集中式快充的基础上,整合光伏等分布式电源,形成可再生能源-储能-充电负荷协同系统,通过并网接口实现与电网的能量交互。

5)离网型。基于分布式电源与储能系统构成独立微网,多位于偏远矿区、海岛等电网薄弱区域。

6)换电。通过更换电池实现能量补给,依托换电舱、换电机器人对标准化电池包进行集中管理与充放电控制,多与集中式快充、光储充站场景协同建设。

考虑到上述多样的交通模式与能源融合方式,传统集中式调度面临海量异质节点接入带来的计算与通信瓶颈,难以实现高效精准管控。因此,V2G的规模化落地必须引入聚合商作为中间层,从聚合商资源调度视角看,V2G本质上是一个多时间尺度、多目标协同的不确定性优化问题。其数学结构可抽象为:

$$\begin{cases} \min_{u(t)} J(x, u, \xi) \\ \text{s.t. } x(t+1) = f(x(t), u(t), \xi(t)) \quad x \in X, u \in U \end{cases} \quad (1)$$

式中: $J(\cdot)$ 为优化目标; x 为状态变量; u 为决策变量; ξ 为随机参数; t 为离散时间变量; f 为状态转移方程; X 为状态变量约束集; U 为控制变量约束集。 f 受交通侧与能源侧的耦合影响。交通侧的运行特征构成V2G方案的逻辑约束,并通过用户行为或车队

运营方式,决定了 f 的形式与控制可行域。包括功率等级、能量来源、电网连接形态等在内的车网融合方式差异形成了互动的物理约束。与此同时,能源侧的调度需求与市场规则,塑造了不同的目标函数 J 。

交通与能源交叉作用引发的优化问题变化并非连续渐变,而是离散跳变。不同交通主体与能源融合方式的组合,会直接重构优化问题的目标函数、决策变量和可行域。例如,私家车的高随机性要求模型引入概率性负荷基线与柔性约束,而公交或重卡则允许混合整数规划模型的构建,进而带来互动潜力、控制架构与通信机制的结构性差异。

因此,本文从能源融合方式与交通模式之间的适配逻辑出发,分析V2G在特定场景下的作用潜力,如图2所示。

分散式慢充主要适合普通用户市内出行的充电需求。通勤、购物等市内出行日均半径多小于50 km,总驻车时长可达20 h以上,充电需求呈非紧急性^[31]。分散式慢充基于用户的长时间停驻特性与规模化效应,具有从配电网到主网、从短时间尺度到长时间尺度的多维V2G潜力。例如,通过动态电价信号,可引导用户在电网负荷低谷或新能源大发时段充电^[32]。当主网频率出现偏差时,可通过聚合平台实现协同响应,调节集群充放电功率^[33]。出租/网约车虽在停运时段存在慢充需求,但相较于普通用户,其总量规模小、驻停时间短且充电需求大。尽管存在与普通用户一致的互动逻辑,但实际可发挥作用的潜力较小。

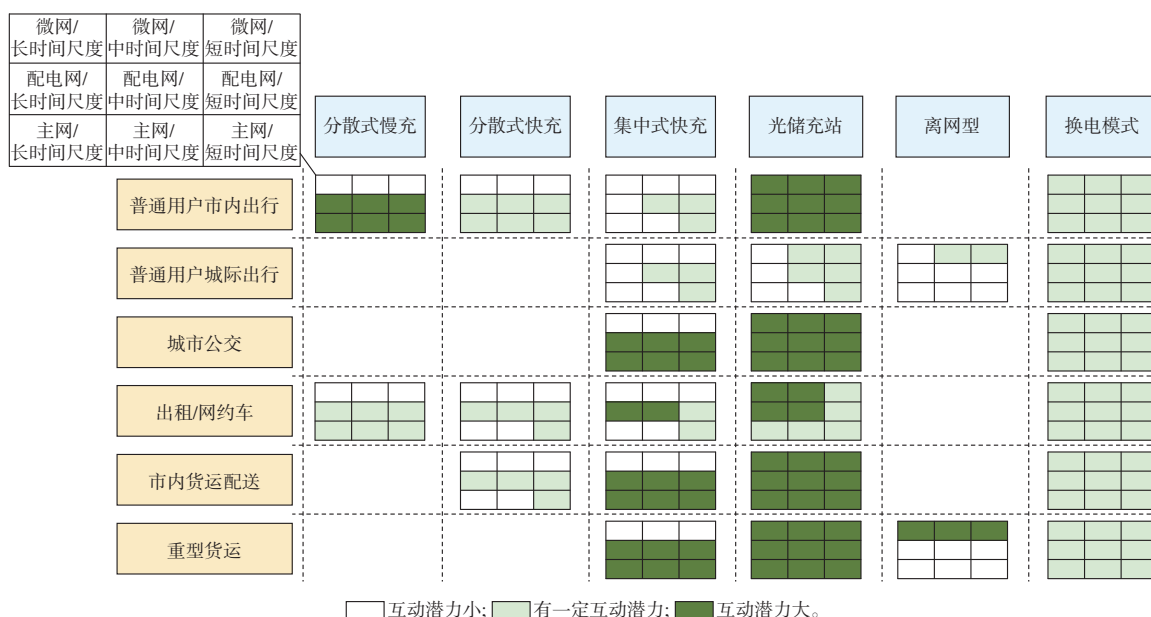


图2 多场景下的V2G潜力
Fig. 2 V2G potential in multiple scenarios

分散式快充既可作为普通用户市内出行临时补能的方式,也可在出租/网约车运营间隙、市内货运配送中转环节提供能量补给^[34-35]。依托自身高功率特性及EV的空间移动性,分散式快充能够在配电网阻塞管理、电压支撑及短时功率平衡等方面发挥作用。例如,当10 kV线路负载率较高时,聚合平台可通过APP将用户引导至周边轻载区域的充电设施。具备双向调节能力的快充桩可向配电网注入无功功率,补偿线路末端的电压跌落^[36]。出租/网约车、市内货运等运营车辆移动范围广、价格敏感度高,同样具有较强的负荷时空转移能力。

除市内出行外,集中式快充还在普通用户城际出行时发挥应急补能作用。高速服务区超充桩可在15~20 min内为车辆补充200~300 km续航,保障用户快速抵达目的地,V2G在该场景同样受刚性出行需求限制。相比之下,城市公交、市内货运配送、重型货运等主体开展集中式快充时具有驻停时间较长、管理统一、计划可编排等特点,非常有利于参与低谷充电与新能源消纳,或快速响应主网频率偏差,展现出一定的多维互动潜力。特别地,单台电动重卡电池容量可达500 kW·h,充电功率超过300 kW,且多以集群方式作业,10辆电动重卡即可提供2~3 MW的调节容量,在电网薄弱地区出现应急情况时,可保障小型作业区24 h基本运营。

相比于集中式快充,光储充站整合了光伏等分布式能源,互动模式更为多元。通过新能源的本地应用,可降低购电成本、平抑峰值负荷、延缓电网改造投资^[37-38]。城市公交与市内货运配送等可优先利用场站、园区新能源满足充电需求,并整合新能源发电、储能和EV多重资源,形成多源互补的灵活调节能力,参与配电网、主网辅助服务^[39]。

离网型充电多部署于偏远高速公路服务区、海岛等电网薄弱地区,V2G的目的在于维持微网供需平衡。对于重型货运,离网型微网可与货运作业区构成能量系统,日间利用光伏为车辆充电,夜间或阴雨天则通过储能与车辆电池协同供电,保障其他负荷运行。在分布式电源出力骤降时,电动重卡或储能释放电量维持微网稳定,最大化系统韧性与能源利用率^[40]。

此外,换电模式可与集中式快充、光储充站等模式融合,借助冗余配置的电池组,形成覆盖多层次、多时间尺度的V2G能力。

1.3 多场景V2G试点应用

近年来,V2G已从理论走向实践,国内外均开展了广泛的项目探索。本文遴选了153项国外项目与55项国内项目作为样本。其中,国外项目主要来

源于V2G Hub数据库^[41]、综述文献^[42-43]及行业报告^[44-45];国内项目则主要依据国家能源局、中国电力企业联合会、国家电网有限公司及中国南方电网有限责任公司等机构和企业公开发布或非涉密的项目资料^[46-55]。限于篇幅,无法逐一列举全部项目,表1展示了近5年各地若干具有代表性的案例。基于对上述共208个项目的分析,从核心关注点、交通模式以及对新型电力系统的支撑作用3个维度进行了归纳,结果见图3与表2。

国外车网互动实践早期示范项目可追溯至2010年左右,从短时间尺度频率/电压调节,到中间时间尺度功率平衡与系统韧性增强,再到长时间尺度能量套利、削峰填谷与可再生资源协同消纳,各类应用场景均有实质性探索,并注重交通模式与能源侧融合方式的适配。例如,英国Electric Heavy Goods Vehicles项目聚焦电动重卡在干线物流中的V2G潜力,验证其在降低全生命周期成本方面的可行性;Wireless V2G for Fleets则针对市内货运配送场景,系统评估了无线双向充放电技术的部署效果与经济性;荷兰“人人智能充电”计划以实现目的地充电智能化为核心目标,联合所有利益相关方协同推进,侧重短期内快速落地见效。商业可行性已成为项目设计的核心考量,见图3(a),近60%国外示范项目明确将商业模式、市场机制或用户激励纳入验证目标。

国内V2G早期探索工作可追溯至2010年左右。“十二五”期间,国家863计划智能电网重大专项前瞻性地启动了多个V2G相关课题研究,并建成了充放储一体化示范电站。近年来,在国家相关政策激励下,V2G呈现出大规模、跨区域发展的鲜明特征。江苏省依托无锡V2G技术验证基地等开展省域试点,累计削峰电量超17 MW·h;苏州充换电虚拟电厂具备20 MW调节能力,响应速度小于1 min、控制精度超90%;南方电网组织的跨省区联动试验覆盖5省63城、超10万辆EV;深圳单轮反向放电示范释放电量逾70 MW·h,涉及84个场站。彰显了中国在大规模聚合方面的制度与基础设施优势。

国内外项目在交通模式上存在显著差异,见图3(b),国外约64%的项目聚焦于普通用户市内出行这一最广泛的形式,致力于挖掘私家车作为分布式灵活性资源的潜力。而国内当前多数项目仍依赖出租/网约车等价格敏感性高或城市公交等可控性强的运营车辆,这有利于快速形成示范效果,但也反映出对主要面向广大私人用户的分散式慢充(包括小功率交流/直流V2G)的模式创新与价值挖掘尚显不足,未能释放其在广域协同、低成本互动等方面的独特价值。

表 1 近 5 年各地 V2G 试点典型案例
Table 1 Typical V2G pilot cases from various regions over past five years

项目名称	地点	时间	交通模式	电网侧融合方式	特色
北京亦庄有序充电示范项目	北京	2024 年 6 月至今	普通用户市内出行	分散式慢充、分散式快充、集中式快充	在不增容的情况下,通过台区智能终端控制充电功率,有效避免负荷高峰期配电变压器重载带来的风险隐患
上海虹口区大二小区 V2G 与移动充电示范项目	上海	2024 年 10 月至今	普通用户市内出行	分散式慢充	利用移动式充电设施作为补充,满足小区日益增长的充电需求,并参与虚拟电厂,在高峰期向电网反送电
天津滨海新区双碳创新示范充电站	天津	2023 年 7 月至今	普通用户市内出行、出租/网约车	光储充站	场站内配置优先使用光伏绿电的零碳休息区,并通过对充电数据的实时展示提升用户互动体验感、参与度
基于“5G+量子”虚拟电厂精准调度的 V2G 规模化实测	安徽	2025 年 5 月至今	普通用户市内出行、城市公交,出租/网约车	集中式快充、光储充站、换电	充放电指令通过量子加密技术传输,提升响应速度,保障数据安全
晋城耿窑重卡光储充换电站	山西	2024 年 5 月至今	重型货运	光储充站	通过光储充换一体化设计,实现了 V2G 在重型商用车场景下的落地
福佑路“光储充放检”新能源综合示范项目	重庆	2022 年至今	城市公交	光储充站	构建源网荷储检一体化微网系统,利用公交车等具备放电功能的车辆,通过微网箱变系统放电给其他车辆使用,最大程度利用场站新能源
无锡 V2G 示范中心	江苏	2023 年 10 月至今	普通用户市内出行、出租/网约车	光储充站	接入无锡市虚拟电厂平台,实时响应电网调度指令,车主可通过预约系统授权平台远程调控充电功率与时序,主动参与电网调峰服务
杭州萧山亚运村超充站	浙江	2023 年 9 月至今	普通用户市内出行、出租/网约车	光储充站	汇集无线充电、大功率充电、V2G 三大技术,并接入国家电网智慧车联网平台,可实现对调度指令的快速响应
济南新旧动能转换起步区充换电示范站	山东	2024 年 5 月至今	普通用户市内出行、出租/网约车、市内货运配送	光储充站,换电	集超快充、换电、光伏发电、车网双向互动于一体,实现了全绿电、零碳排的可持续运营模式
莲花山超充站	广东	2024 年 11 月至今	普通用户市内出行、出租/网约车、市内货运配送	光储充站	搭载国产通用系统,使电力设备间可即插即用、数据互联互通,车主可自主选择全绿电充电
Fermata Energy V2X Pilot	美国	2021 年至今	市内货运配送	集中式快充	通过需量电费管理参与需求响应,并在夏季高峰期反向供电,验证了 EV 在削峰降本和提升电网韧性方面的多重价值
Vehicle-to-Building EV Pilot	美国	2021 年至今	普通用户市内出行	分散式快充	通过双向充放电技术向市政休闲中心反向供电,有效削减建筑峰值负荷
ABB V2X Trondheim	挪威	2022 年至今	普通用户市内出行、出租/网约车	分散式慢充、分散式快充、集中式快充、光储充站、换电	验证了 EV 在社区尺度上对可再生能源本地化生产和消纳的支撑作用
Vinnova Polestar V2G Pilot	瑞典	2023—2024 年	普通用户市内出行、出租/网约车	分散式慢充、分散式快充、集中式快充、光储充站、换电	汇聚来自欧洲多个国家和地区的能源基础设施领域参与方,探索具有可扩展性、可跨区域推广的 V2G 商业模式
Flinders University V2G Trial	澳大利亚	2023 年至今	普通用户市内出行	光储充站	在夜间利用风电充电、白天结合校内 2.2 MW 光伏供电,并于南澳电网晚高峰时段向校园电网反送绿电
Drossone V2G Project	意大利	2023 年至今	普通用户市内出行、出租/网约车	光储充站	利用停车场中闲置的 EV 向输电系统运营商提供调频、功率调节等快速备用辅助服务,实现多重价值变现的新型商业模式
Electric Heavy Goods Vehicles - V2X	英国	2024 年至今	重型货运	集中式快充	聚焦电动重型货车在 V2G 中的潜力,帮助车队管理者在满足货运运营需求的前提下,对充放电进行调度,实现商业效益最优
Wireless V2G for Fleets	英国	2024 年至今	市内货运配送	分散式慢充(含无线充电)	通过无线双向充电提升车辆连接时长,最大化车队的收益潜力

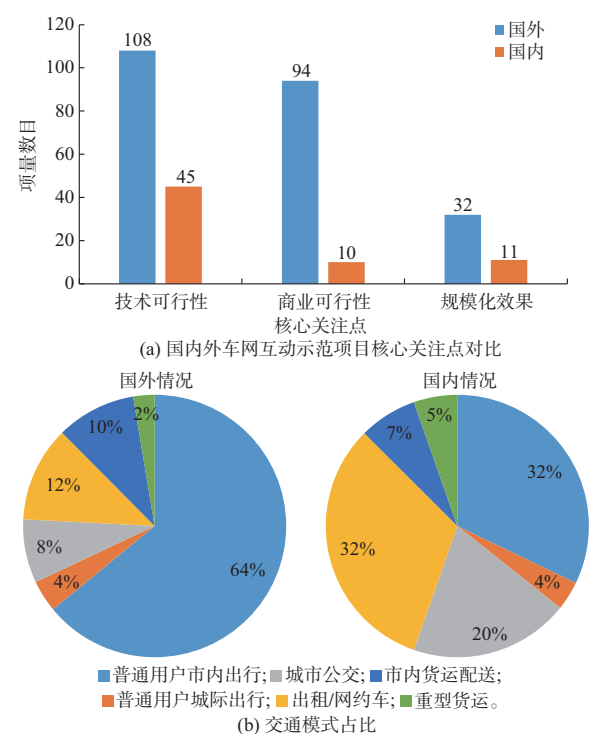


图3 国内外代表性V2G示范项目统计
Fig. 3 Statistics of representative V2G demonstration projects at home and abroad

表2 面向多时间尺度多层级电网侧支撑的国内外试点项目数量对比
Table 2 Number comparison of domestic and international pilot projects focusing on multi-timescale and multi-level grid-side support

类型	长时间尺度		中时间尺度		短时间尺度	
	国外试点项目数量	国内试点项目数量	国外试点项目数量	国内试点项目数量	国外试点项目数量	国内试点项目数量
微网	58	20	18	7	2	1
配电网	67	25	29	18	6	2
主网	15	5	38	12	42	8

从服务新型电力系统的目标上看,如表2所示,国内试点多聚焦于长时间尺度的削峰填谷与新能源消纳,在短时间尺度动态支撑能力方面的探索略显滞后。在主网层面,国外已有数十个项目成功参与输电运营商主导的调频辅助服务市场,而国内仍处于技术验证阶段。这一差距不仅源于技术标准与通信协议,更受限于市场准入、价格信号、责任边界及可持续的收益分配等方面的障碍。

当前,国内试点项目的成效呈现多聚焦于互动电量、可调功率等指标,对V2G在新型电力系统中的具体效果,如配电网电压稳定性提升幅度、线损率降低比例、多层级新能源消纳率改善程度等定量评

估较为缺乏。此外,多数示范项目依赖对用户的超额经济补偿以调动其参与的积极性,在短期内有效验证了技术路径的可行性,但由于未形成可持续的市场化盈利机制,长期推广的经济韧性仍显不足。

2025年4月,国家发改委等四部委联合印发了《关于公布首批车网互动规模化应用试点的通知》^[8],标志着中国V2G迈入制度化、规模化发展的新阶段。笔者建议未来试点建设应重点关注以下3个方面:一是强化多场景融合能力,推动V2G模式与不同交通需求及多样化电网融合方式的协同;二是构建包括可调容量、响应速度、持续时长等在内的多维度量评估体系,科学测度V2G在多时间尺度下对新型电力系统的多层级综合贡献;三是打造可持续发展的商业模式,形成可复制推广的市场化路径,为V2G的长期规模化应用提供保障。

各地V2G项目补贴主要采取“建设+运营”双轨并行的激励模式。在建设补贴方面,深圳、南京、海口^[56-58]等地采用成本差额补偿法,依据双向充放电设备与常规充电桩的功率等级差异给予定额补贴;广州、合肥^[59-60]则以项目总投资为基数实施比例补贴。虽有助于在示范初期降低投资门槛,但存在重硬件投入、轻调节能力的倾向,可能未充分反映实际可调容量、响应速度、持续时长等方面的价值。上海^[61]则创新性地将补贴与电网调节能力考核结果挂钩,并支持私人桩智能化改造,为建设补贴方向提供了参考。

在运营补贴方面,杭州、成都、广州^[59,62-63]等地尝试通过放电电量或可调容量补贴激励用户参与互动。然而,这些措施本质上仍属于行政性价格干预,缺乏与电力市场的联动,难以真实体现V2G资源的边际价值。根本问题在于,由于计量和核算手段不足,当前价格机制难以刻画V2G在基线充电功率的基础上发挥的调节作用,而该互动模式现阶段可以通过有序充电实现,若配套合适的价格机制,能够发挥较大的互动潜力及经济价值。

尽管四川、广东、江苏、山东^[64-67]等地已探索放电商上网价格与电力市场衔接,但这些机制仍局限于对放电能量本身的计价,未对V2G所提供的快速响应、电压支撑等辅助服务进行独立定价。EV作为移动储能单元的多重价值被简化为单一电能商品,导致其在辅助服务市场、容量市场等高价值场景中难以获得合理回报。

2 V2G规模化推广的挑战

2.1 规划层

在基础设施协同规划方面,充电基础设施建设

与配电网升级存在不同步问题。随着EV充电渗透率的快速提高,中低压配电网的扩容改造需求迅速上升。以国内多个有序充电试点为例,北京亦庄、天津滨海新区等项目虽通过智能调控有效缓解了局部台区重载问题,但配电网改造均针对个案开展,缺乏与中长期EV渗透率预测和互动潜力评估的联动机制。同时,配电网智能化升级投资大、回报周期长,若缺乏明确的成本分摊与收益共享机制^[68-70],将制约充换电设施接入与EV互动能力的释放。

此外,V2G需要符合交通模式的特征。当前多数示范工程主要聚焦于充放电聚合控制,调度策略多以电网侧负荷曲线优化为目标,未将关键交通要素纳入协同决策框架。尽管学术界在交通-电力耦合建模与协同规划方面已有相关理论成果^[71],但在工程实践中,充电设施布局、互动运行方案与城市交通之间仍缺乏匹配性规划。

2.2 设备层

作为直接执行载体,设备层的性能和标准化水平决定了V2G系统的稳定性与可扩展性。当前,双向充放电对动力电池健康状态的影响机制尚缺乏充分实证支撑。尽管部分车企已在特定车型中开放V2G功能,但主流电池体系在频繁循环下的容量衰减规律、热管理边界等仍未形成统一评估标准。这一不确定性加剧了用户对电池损耗的担忧,抬高了双向互动的激励成本。此外,当前具备互动功能的充电桩多依赖定制开发,单位成本高,未触发电量-降本-普及的良性循环。试点项目反映,充电桩采购与运维成本显著高于预期,限制了部署密度。

中、短时间尺度的V2G目标有赖于高实时性的数据交互,但当前的通信解决方案(如电力线通信(PLC)、WiFi、4G/5G)在配电网和充电站的复杂实际环境中常存在延迟、丢包等问题,无法满足对频率调节等辅助服务的快速响应需求。在跨省V2G试验中发现,因部分充电站通信链路不稳定,约20%以上的调度指令未能及时执行。同时,充电桩作为边缘节点面临潜在的网络攻击风险,现有的加密与认证协议难以完全防御^[72]。某示范项目开展的安全测试显示,部分V2G桩未实现双向身份认证,存在被恶意终端模拟并注入虚假负荷指令的风险,制约了V2G在高安全等级场景中的应用拓展。

2.3 平台层

V2G平台承担信息整合和调度决策等关键任务,当前普遍存在架构封闭、功能不全和算力不足等问题。V2G需处理来自电网调控平台、充换电运营平台、政府与社会监管平台、车企监测平台以及交通、气象辅助平台等多源数据。然而,各充换电运营

平台与电网调控平台之间缺乏统一的接口规范与数据交互标准^[73],数据共享不畅、不同运营商平台之间难以协同调控,使得跨平台、多维度、多目标的聚合管理难以实现。例如,非电网企业直属的第三方充电运营商,在与电网交互中存在语义不一致与协议不兼容等问题,导致部分充电运营商难以实时接入电网调度指令,削弱了聚合资源的完整性。

同时,大规模EV集群优化涉及高维非线性问题求解,传统集中式调度面临困境,而分布式策略需平衡通信开销与收敛稳定性,现有平台架构难以支撑^[74]。此外,由于V2G涉及用户身份、出行轨迹、电池健康状态等敏感信息,传统数据脱敏技术难以平衡隐私保护与调度精度需求,而联邦学习等隐私计算技术因通信开销大、泛化能力弱,尚未实现实际场景的规模化应用^[75]。

2.4 机制层

当前,V2G规模化推广缺乏可持续的市场化运营模式,未能有效构建电网效益、运营商利润和用户收益的协同机制。首先,V2G的电网侧价值具有长期性与间接性,缺乏统一量化评估标准和方法,阻碍了精准长效激励机制构建。峰谷电价模式无法形成适配V2G分布式和灵活性特征的有效价格信号^[76]。

同时,现行电力市场建设主要围绕传统集中式电源设计,EV集群面临市场准入门槛过高和交易机制不适配等障碍。因此,V2G设施及系统部署的初始成本与回报不确定性导致运营商面临亏损风险,运营商参与互动的长期意愿不足。

此外,V2G的权责划分与技术标准尚未明确。多方参与主体在设备维护、数据权属和故障处理等关键责任上边界模糊^[77],易引发纠纷并推高交易成本。数据交互、聚合资源涉网性能(响应/精度)缺乏统一标准^[78-79],进一步制约了V2G的业务开展。

2.5 用户层

认知不足、信任缺失和行为固化是当前V2G在用户层面临的主要问题^[80-81]。信息透明度低与技术宣传不足导致普通EV用户难以充分认识V2G潜在价值。多数用户仅将EV视为交通工具,对其作为分布式储能资源参与电网调节的潜力缺乏基本认知。调研显示:超过60%私家车主不了解V2G可能带来的经济或环境效益^[82]。用户对技术可靠性存疑,普遍担忧电池老化、过热甚至起火等安全隐患,对于互动激励政策的明确性、稳定性以及收益结算的及时性与透明度也缺乏足够了解,实际获得感不足。

此外,普通用户存在行为固化倾向,已适应“即到即充”模式,对V2G可能带来的操作复杂性(如设定充放电计划、响应电网信号)存在天然的抵触心

理。出租/网约车司机等运营效率敏感型用户的行为模式围绕最大化运营收益,对于参与V2G可能导致的时间成本增加存在担忧。

2.6 标准层

在V2G标准的早期探索阶段,IEC 61851和ISO 15118等标准初步确立了充放电技术框架^[83-84],但通信协议以单向为主,数字化与安全能力有限。ISO 15118-20与OCPP 2.1等标准的出现,实现了对智能调度与即插即充的原生支持^[85-86],V2G标准进入体系化与互联互通阶段,但系统级网络安全与跨平台互操作仍存短板。当前,标准重心转向商业模式实现、安全可信协同与规模化部署,通过OCPP 2.0+、IEC 63110及ITU-T分布式账本等技术,构建涵盖交易、认证、隐私保护的全链条标准体系,但仍面临标准碎片化与系统级测试验证不足等挑战。

国内V2G标准体系已初步规划覆盖基础通用、设备接口、服务平台、负荷聚合和建设运行五大类共90余项标准的完整框架^[87-88],在充换电设施基础标准、有序充电通信协议、聚合平台信息交互等方面持续完善,展现出较强的体系化推进能力,为EV与电网融合发展提供了全方位系统化的标准支撑,指导了多项示范工程的开展。

然而,标准体系的落地应用仍面临挑战。当前不同品牌EV与充电桩在物理接口、电能传输协议和通信标准上尚未完全统一,国际体系与国内标准并行存在。更关键的是,现有标准多聚焦于单一环节或孤立场景,未能形成覆盖全链条的协同架构,仍存在内容重叠、要求冲突、互补性不足等问题。特别地,针对V2G潜力最大、服务于普通用户市内出行的分散式慢充场景,硬件及通信标准尚未实现闭环。

此外,安全标准对V2G网络安全、数据流转边界、隐私脱敏规则等缺乏规范,用户敏感信息在多主体间流转时存在滥用与泄露风险,致使各参与方不得不自行定义技术逻辑,形成技术壁垒;同时,对响应速度、调节精度等核心性能指标缺乏统一定义与测试方法,制约了V2G资源作为标准化灵活性产品进入电力市场的进程。这些问题的根源在于标准制定缺乏有效跨行业协同机制,难以凝聚发展合力,最终阻碍了V2G从试点示范向规模化、市场化演进进程。

3 V2G规模化应用的创新需求

3.1 总体架构

作为能源与交通系统融合的核心载体,V2G理论、技术和市场创新需满足三方面要求。首先,需具备适配多场景融合的弹性,既通过标准化接口和跨域数据融合等通用设计支撑普适性功能,又针对不

同交通和能源场景的特殊性,提供差异化解决方案。其次,需构建合理满足用户需求和助力多层级新能源消纳的价值导向机制,精准匹配用户出行与充电需求,以较低的社会成本引导其参与互动,并实现新能源发电与充放电负荷的多层级友好协同。最后,需形成问题导向的全链条技术方案,在规划层破解资源接入瓶颈,在设备层突破硬件限制,在平台层实现多系统联动,并通过市场机制优化打破壁垒,依托多样化激励提升用户参与度,全面解决各环节实际痛点。

针对上述要求,本文提出V2G总体创新架构,如图4所示。装备层致力于支撑高效率、低延迟的双向能量交换与器件级控制。引入宽禁带半导体材料与紧凑型拓扑架构,提升功率密度与转换效率。依托高频双向智能计量终端与硬件在环测试技术,保障双向充放电控制系统、光储充系统的可靠运行与精准响应。系统集成层在满足交通侧出行需求前提下进行优化调度,基础预测模块引入注意力机制等方法,突破传统时序模型限制,实现零样本预测与跨领域迁移,支撑交通-充电-电网系统全局规划。采用云边端分层协同机制,将多智能体深度强化学习与高级运筹学算法相融合,高效求解路径-充电联合优化及有序充放电的聚合调控难题。市场机制层旨在通过经济信号驱动各方参与,设计双边/集中交易模型,打通零售与批发市场机制,进一步融合绿电与绿证交易,实现资源优化配置。安全防护层建立涵盖通信与硬件的综合风险预防机制。利用跨域信任体系、公钥基础设施及基于联邦学习的入侵检测系统,辅以骨干通信物理级加密,抵御网络攻击。采用电池健康感知与协同管理和故障诊断与预警,保障资产安全,消除用户焦虑。在标准体系层,建立多层级框架(基础/接口/服务/聚合/电网),规范通信协议、数据一致性、检测认证及互操作性,推动产业规模化发展。

V2G技术架构与新型电力系统技术体系深度耦合,兼具交通-能源交叉领域特色。多层级技术要素需紧密配合,协同驱动系统演进。以电力电子、电池管理、电网调度等技术为物理基座,深度融合人工智能决策、大数据分析及数字孪生仿真等新兴技术,构建跨域融合协同的生态闭环。

针对普通用户分散式慢充等场景,聚焦低成本、广覆盖的规模化互动能力构建。突破单向可调充电桩的标准化改造技术,依托出行预测与云边端协同,实现海量碎片化资源的智能聚合与无感调度,在保障用户出行与充电核心需求的前提下,挖掘可调潜力并开展柔性调控。

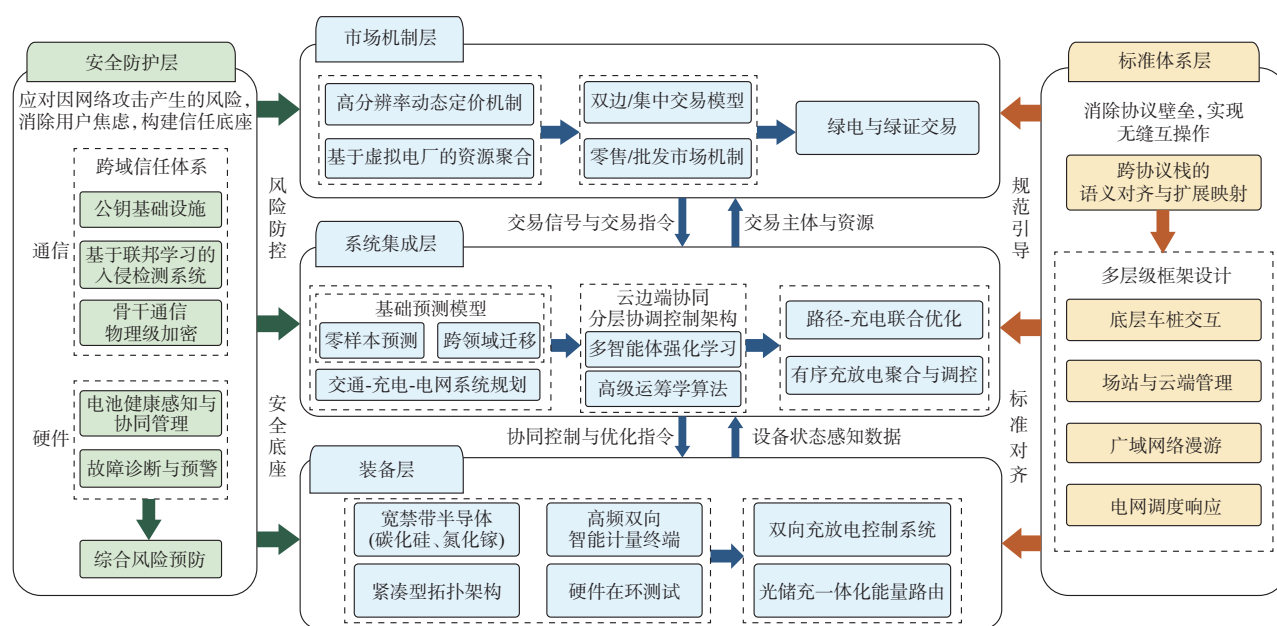


图4 V2G创新需求架构
Fig. 4 Architecture of innovative requirements for V2G

针对电动重卡、城市公交等高可控资源,聚焦高可靠性、高响应精度的调节服务能力打造。攻关大功率双向充放电装备与场站级光储充一体化能量路由技术,提升能量转换效率与设备循环耐用性。统筹车辆运营计划、场站充放电计划与电网多时间尺度调节需求,实现可调资源的全场景管控,明确响应精度、可靠性考核标准,推动运营车辆深度参与调频等各类高价值电网辅助服务市场。

3.2 前沿创新方向

1) 基于大模型的EV用户画像

作为充电策略的参与者,EV用户自主决策对充电负荷时空分布和可调范围有重要影响^[89]。在V2G研究初期,多采用随机选择模型或基于代理的建模方法刻画用户充电决策,假设用户行为具有完全理性或服从特定概率分布。然而,用户的充电选择受到包括EV物理状态、自身需求、充电站条件、充电价格和引导措施等多种元素影响,存在较强的非线性。同时,人的行为具有多样性、随机性和非完全理性,不同的用户甚至相同的用户在同等条件下可能会做出差异化的决策,进一步加深了模型的复杂性^[90]。依赖解析数学模型分析非完全理性用户行为可能存在局限。

基于生成式预训练Transformer架构(generative pre-trained Transformer, GPT)的大语言模型(large language model, LLM)具有强大的文本生成和理解能力^[91]。基于大规模网络文本数据的学习,LLM在模仿人类行为方面具有先天优势。一

些社会学领域的研究者探索了利用LLM进行用户行为模拟的潜力^[92-94]。利用LLM进行针对性微调,代替真实EV用户开展行为仿真与推演,能够显著降低实验成本、提升效率,并捕捉传统解析模型难以刻画的用户表现。

在出行行为建模领域,LLM的应用价值已得到初步验证。文献[95]通过提示词工程将出行特征变量转化为结构化文本,使LLM能够有效执行出行方式选择与目的地预测任务,准确率优于传统机器学习模型。文献[96-97]进一步提出集成记忆模块、偏好嵌入与动态反馈机制的LLM代理框架,显著提升了模拟行为与真实用户轨迹的一致性。这些进展为考虑规模化非完全理性用户决策行为的EV充电仿真、预测和优化提供了新的思路。通过微调或提示工程,LLM有潜力替代真实用户提供反馈,高效生成高保真度的充电负荷时空分布与可调潜力数据。

调用LLM获取用户的即时反馈对模型推理速度提出较高要求。此外,受隐私保护约束,模型通常需部署于本地边缘设备,进一步限制了模型的参数规模与硬件条件。若依赖大参数量LLM通过复杂代理架构提升行为真实性,其推理延迟往往难以满足仿真需求。因此,未来研究需聚焦模型轻量化、领域适配与云-边协同推理等方面。

2) 深度网络驱动的交通-能源融合规划与调度

V2G是交通网络与能源网络深度耦合的关键节点,涉及电网、充电设施、交通流、分布式能源等多元异构主体,动态交互过程呈现高度的时空关联性、

强非线性和不确定性。同时,交通需求的随机波动、可再生能源的间歇性出力以及用户响应的复杂性,使得传统基于物理方程和简化假设的优化模型难以精确刻画系统全貌,也难以适应大规模实时决策的需求^[98]。此外,自动驾驶技术的发展与应用,也给交通-能源耦合系统带来新的特征与挑战^[99]。

图神经网络、时空网络和深度强化学习等基于深度网络的学习方法具备强大的特征提取、模式识别和端到端优化能力^[100-102]。能够从海量多源异构数据(如电网运行数据、交通流数据、充电行为数据、气象数据)中自动学习复杂的耦合规律和非线性映射关系,有效捕捉交通-能源融合系统的动态特性和不确定性。通过构建深度网络驱动的融合模型,有望突破传统方法的局限,实现对有人与自动驾驶混行场景下交通流与能源流的联合状态感知、多时间尺度协同预测以及复杂约束下的实时优化决策,为构建高效、鲁棒、自适应的交通-能源融合规划与调度体系,支撑V2G开展,提供了强有力的工具。

上述技术路径已在V2G领域取得初步验证。文献[103]通过引入多视角超图结构捕捉充电站群体协同行为,并结合多时间尺度输入与跨注意力融合机制,提升了充电需求预测的精度。文献[104]将大规模EV充电调度问题建模为图结构,融合图神经网络与强化学习,实现了千辆级EV的实时协同控制。文献[105]提出了一种基于图神经网络的多智能体强化学习框架,实现了电动出租车调度与充电站动态定价的协同优化。

当前方法在实际部署中仍面临挑战:一是可解释性不足,黑箱决策难以满足电力系统对安全认证与故障溯源的要求;二是泛化能力受限,模型在极端天气等训练外场景下性能急剧下降;三是计算资源需求高,复杂网络结构难以在能量路由器、充电桩等边缘设备上实时运行。未来研究需聚焦于训练和决策过程中的物理信息嵌入以及数据隐私保护,并开展大小模型融合的轻量化网络架构设计,推动深度网络从实验室原型转向工程可用系统。

3) 基于数字孪生的V2G系统仿真

作为连接电网与海量分布式EV的桥梁,V2G的仿真需真实反映物理设备特性、通信网络性能、市场机制设计以及用户群体行为的综合影响。V2G是典型的信息-物理-社会复杂系统^[106]:物理层涉及电池充放电特性、电力电子变流器动态、配电网潮流约束;信息层涉及通信延迟、数据安全、协议交互;社会层涉及用户参与意愿、响应策略、市场博弈。各因素具有多尺度、高维度、强耦合的特征,使得仿真平

台的构建较为困难。

数字孪生通过构建物理系统在虚拟空间中的全要素、动态、高保真映射,为破解上述难题提供了思路^[107-108]。基于数字孪生的仿真平台需整合EV电池模型、充电桩模型、配电网模型、通信网络模型、市场模型及用户代理模型,实现物理世界与信息世界的实时交互与闭环验证,在安全可控的虚拟环境中,对大规模EV的充放电行为、可调度能力、市场交易策略以及不同引导措施效果进行前瞻性推演,能揭示传统简化模型难以捕捉的复杂现象和潜在瓶颈。

近年来,数字孪生在能源系统中的应用已从概念走向工程实践。德国能源公司E.ON利用数字孪生平台实现了包括EV充电桩在内的海量分布式资源接入申请的自动化评估^[109]。中国深圳市基于城市级全域数字孪生平台,利用数字孪生技术实现了V2G全流程的实时监管与智能调控,支撑了大规模反向放电示范活动的管理。

V2G数据来源分散、格式不一、更新频率差异大。现有系统尚难以实现电网动态与用户行为的同步建模,导致无法真实反映V2G集群的可调度潜力与响应边界。多数项目仍停留在可视化或离线仿真阶段,缺乏与调度指令、市场出清、用户反馈的实时闭环联动。

4) 高适应性低成本的双向互动设备及系统

如2.2节所述,现有充换电设施在多类型电网拓扑和运营场景下兼容性与适配性不足,难以支撑电网灵活调节需求,亟须发展高适应性、低成本的双向互动设备及系统,以有效降低大规模部署的门槛,推动V2G由试点向规模化应用转变。

一方面,应推动设备接口与通信协议的标准化,实现与多品牌、多型号EV的无缝兼容与即插即用。通过采用模块化设计和统一物理/通信接口,可显著降低设备开发与后期运维成本,提升互操作能力。另一方面,针对海量分散式慢充私桩,需突破高效紧凑型双向功率变换拓扑、高精度低成本计量芯片及快速测控算法。而新型单级或准单级拓扑可有效提升功率密度与效率,同时降低成本。例如,威迈斯、汇川等企业已推出基于图腾柱功率因数校正电路和CLLC谐振变换器的双向车载充电机,满载效率达95%以上;阳光电源公司则通过单级拓扑去电解电容设计,将效率提升至96.2%,同时增强高温环境下的可靠性。

高适应性与低成本并非相互排斥,需通过标准化、模块化、器件革新与系统集成协同实现。未来,随着碳化硅、氮化镓等宽禁带器件成本下降及液冷

热管理技术进步,双向互动设备有望在保持高性能的同时,进一步控制增量成本。

5) 基于构网型技术的分布式自主互动

在调频调压等秒级响应场景中,集中指令传输、聚合决策、终端执行的链路过长,难以满足高实时性要求。需提升海量分散式充电桩的自主调节能力,利用本地电网状态信息实现快速响应。传统方案需改造充电桩通信模块并部署边缘计算节点,成本高且可扩展性差,难以支撑千万级终端的广域部署。

构网型技术为破解上述瓶颈提供了新路径。通过重构充换电设施的控制策略,使其具备类似同步机组的电压源特性,能够自主感知并响应接入点的电网频率与电压状态,在无需外部调度指令和远程通信的前提下,实现对充放电功率的本地调节。这种“就地感知-就地决策-就地执行”的分布式自治模式,能够显著降低对通信系统的依赖,提升系统的鲁棒性与可扩展性。

构网型技术在充电基础设施中的应用当前仍缺乏统一的性能检测标准与入网认证体系,不同厂商对频率响应门槛、电压下垂系数等关键参数定义不同,多台设备并联运行时存在协同风险,与现有跟网型设备混接时的兼容性问题尚未充分研究。未来亟须加快制定构网型充换电设施的技术规范、测试方法与并网导则。

4 V2G未来发展愿景与路径分析

4.1 V2G远期愿景

未来,随着中国EV保有量突破亿辆级,V2G将

实现全域协同、智能渗透、价值共生的系统性愿景。在互动形态上,构建分层分类、精准适配的多元场景协同体系,需求响应和主动调控的方式并存。例如,普通用户市内出行的分散式慢充依托广域覆盖优势,通过智能调度融入居民生活用电场景,支撑配电网削峰填谷与分布式光伏消纳;出租/网约车、城市公交等运营车辆依托集中式快充与换电模式,参与配电网阻塞管理与灵活调节;重型货运与城际出行车辆则通过超快充与绿电直供模式,支撑主网调频或跨区域风电、光伏的时空匹配。因地制宜地释放不同车型、不同融合场景互动潜力,使规模化EV成为连接分布式能源与新型电力系统的柔性纽带。

新一代充电设施与V2G标准体系将实现高质量深度融合,通过接口规范、通信协议、安全认证等关键标准的统一,打破品牌与行业壁垒,保障互操作性。基于全域数智化平台,将充放电决策融入EV日常行驶与作业流程,实现“停车即充电”的无感补能与“充电即互动”的自动响应。推动V2G从技术示范走向行业普惠,既实现分布式可再生能源的就地消纳,同时为新型电力系统提供规模化可调节资源,又通过无感互动提升用户低碳出行体验,助力双碳目标的实现。

基于上述互动愿景,参考《节能与新能源汽车技术路线图3.0》^[110]设定了2035年和2040年各车型占比、电池容量、循环寿命等参数区间范围,如图5所示。

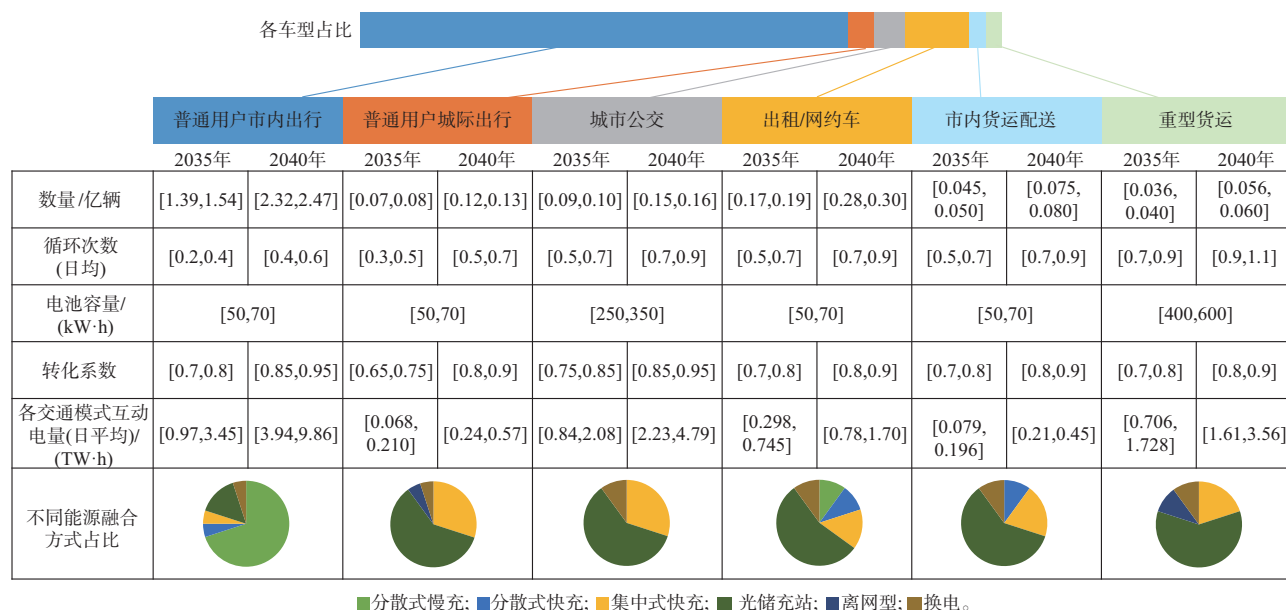


图5 2035年和2040年的各车型参数估计

Fig. 5 Parameter estimation of each vehicle type in 2035 and 2040

面向当前至2040年的不同场景,根据式(2)对潜在互动电量进行估算:

$$E_d = \sum_{i=1}^n \eta_i N_i k_{d,i} C_i \quad (2)$$

式中: E_d 为EV总互动电量潜力(日均); n 为EV总类型数; η_i 为*i*类型EV循环电量向互动电量的转化系数,受V2G发展水平限制; N_i 为*i*类型EV车辆数; $k_{d,i}$ 为锂电池循环寿命的约束下,不影响*i*类型EV正常使用周期时的日均可接受循环次数; C_i 为*i*类型EV平均电池容量。

假设式(2)中各参数在区间内平均分布,采用蒙特卡洛抽样模拟计算日均互动电量潜力,分别得到悲观、平均和乐观3类估计结果:在模拟中,互动潜力值小于悲观、平均和乐观估计值的概率分别为5%、50%和95%,如图6所示。

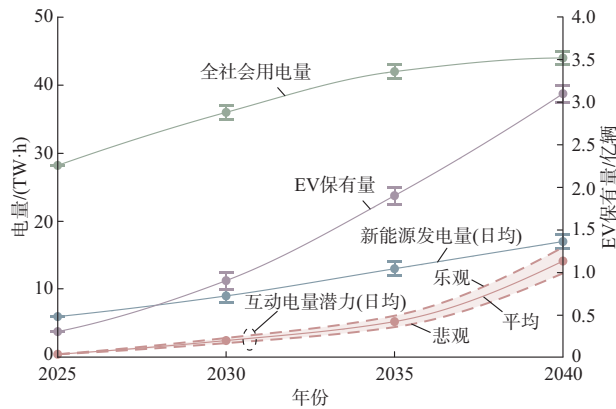


图6 互动潜力发展趋势(2025—2040年)
Fig. 6 Development trend of interactive potential (2025 to 2040)

2035年,EV保有量将达1.8~2.0亿辆。其中,约80%为电动私家车,按95%用于市内出行折算,有效互动车辆为1.39~1.54亿辆,平均电池容量取50~70 kW·h。届时,锂电池循环寿命有望达到2 000次以上(容量衰减率 $\leq 20\%$),若按日均0.2~0.4次充放电循环计算,总循环次数不会对车辆正常使用造成影响,若转化系数达0.7~0.8,该类车型的日均互动电量可达1.98 TW·h。采用相同方法测算出租/网约车、重型货运等车型的互动潜力,尽管其保有量占比相对较低,但电池容量大、充放电循环频率高,同样具有较大的互动电量。综合各类车型的潜在贡献,乐观估计下全社会EV日均互动潜力可达6 TW·h,约占2035年全社会用电量^[111]的15%及新能源发电量^[112]的40%。

至2040年,除EV保有量增长外,电池循环次数、转化系数等影响因素的改善共同带来了预期互动电量的提高。平均估计下,日均互动电量潜力可

提升至14 TW·h。接近届时风、光等新能源的日均发电量^[113]。V2G有望成为新型电力系统中支撑源网荷储协同的关键调节资源,并由此可望催生千亿至万亿级规模的服务市场。

需要指出的是,式(2)作为一种简化估算方法,目的在于评估V2G受电池容量与可用循环次数约束下的能力上限。因此,不同类型车辆可采用统一表达式,仅需调整日均循环次数、电池容量等参数即可实现通用化估算。尽管实际互动能力受基础设施、政策机制与用户行为等多重因素制约,但该数据可作为系统规划与潜力挖掘的参考目标。

4.2 发展路径与工作建议

4.2.1 发展路径

V2G的发展需多维协同促进,其核心逻辑是从简单能量交互向复杂系统演进,具体表现如下:

1)能量流动形态的迭代。初期以单向能量流动为主,逐步过渡至单双向流动并存。

2)空间互动范围的拓展。从本地微网或配电网的局部互动,逐渐形成本地互动与广域互动的协同模式。

3)互动场景的专业分化。初始阶段场景模糊且同质化,随着交通主体与能源需求的细化,场景向多样化、专业化延伸。

4)时间尺度的全维覆盖。早期互动以能量平衡为核心,逐步纳入中频与高频调节,形成全时间尺度响应能力。

5)用户参与机制的升级。由依赖政策驱动的高经济回报吸引用户参与,逐步转向互动在充电服务中的无感融入。

6)智能化技术的深度渗透。从人工操作向自动化、网联化和数智化升级。实现自动充放电接入、资源动态聚合、多目标调度的全流程智能化闭环。

V2G的发展遵循技术扩散与市场培育的规律,包括培育期、成长期、成熟期3个阶段,如图7所示。培育期以政策为主导,聚焦技术可行性验证和宣传V2G。互动形式同质化,多表现为电量型互动。不同行业、企业的技术规范兼容性差,市场内生动力不足,尚未形成针对不同交通主体的差异化方案。成长期呈现政策引导向市场驱动过渡的特征,技术与模式加速迭代。政策逐步从直接补贴转向机制建设,市场主体开始探索可持续商业模式。互动形式拓展至灵活调节、辅助服务等多元形态。多层级标准体系逐步建立。针对公交、货运的定制化方案涌现。用户引导从单纯经济激励向服务体验优化延伸。成熟期以市场主导为标志,形成完善的V2G生态。市场机制成熟,良性竞争格局形成,企业通过技

技术创新与服务优化获取收益。互动形式与场景实现精准适配。本地与广域互动高效协同, EV 集群成为新型电力系统的核心调节资源。标准体系全面完善且兼容性强, 实现跨品牌、跨领域、跨区域的无缝协同。

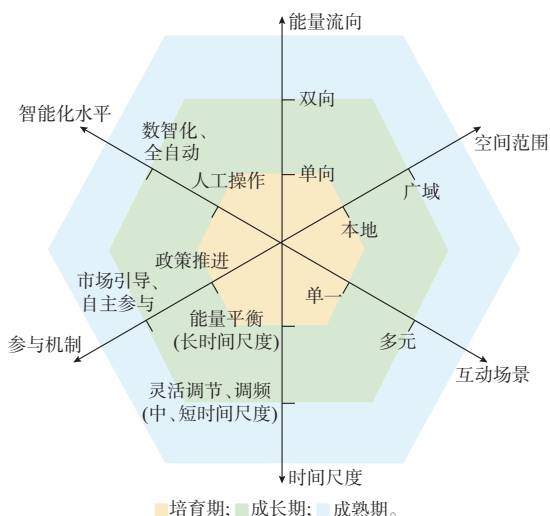


图7 V2G发展路径
Fig. 7 Development path of V2G

4.2.2 工作建议

现阶段V2G正处于培育期向成长期过渡的阶段,除突破技术瓶颈外,还需培育市场内生动力,夯实规模化发展基础,为此可重点开展以下工作:

1)当前V2G示范工程多以放电量为互动效果的评价指标,在一定程度上推动了相关新技术的示范落地。然而,放电模式仍面临用户接受度、存量设施适配性等现实瓶颈,规模化应用效果受限。基于现有发展条件,应充分依托既有低压配电网资源,布局成本可控、适配单向功率调节的V2G模式,并健全充放电调控对电网支撑贡献的量化评价体系。小功率V2G充电桩(直流或交流)单桩改造成本较低,且与互动潜力最大的普通用户城市内短途出行模式高度契合,具备规模化推广的天然优势,可为V2G技术的市场化落地提供基础性支撑。

2)推动V2G全产业链生态构建。当前各核心参与主体尚未形成统一认知。例如,作为车端硬件与控制逻辑供给方的车企,面临成本、潜在风险与预期收益不清晰等问题,对单/双向V2G功能的预装、协议开放和存量升级普遍态度较为保守,造成全链路协同的薄弱点。为此,需支持车企和充放电运营企业协同开展技术研发和商业模式探索,鼓励车企参与V2G聚合商建设,有效发挥车侧主动调控能力,并建立V2G场景下的电池衰减量化评估与责任

界定等机制,精准出台针对各核心参与主体的差异化政策激励措施,推动全产业链联合创新与协同落地。

3)针对电动重卡、城市公交等专业性、可调度性强的运营车辆,优先开展技术攻关与场景验证,强化行业共识。此类车辆具有电池容量大、便于集群管理等特征,通过专项试点,量化其对电网的实际效益,直观展现V2G技术的系统价值。

4)以试点应用为载体,系统加强用户培育与引导。当前用户对V2G技术的认知仍局限于“反向放电”的概念,对其安全性、经济性存在普遍顾虑。通过社区、商圈等场景的试点示范,结合具象化宣传,消除用户心理壁垒,建立功率调节同样为V2G的认知,降低参与门槛,逐步提升用户参与意愿。

5)完善政策体系的同时,构建针对性市场机制,形成政策与市场双轮驱动的发展模式。通过建立互动价值量化体系(如调频服务按响应精度定价、调峰服务按负荷转移量计费),明确电网、运营商、用户等主体的权责利分配。完善辅助服务市场准入规则,以价格信号引导V2G资源优化配置。降低V2G等灵活性资源准入门槛,增强其盈利预期。形成“用户获益、电网增效、企业盈利”的闭环机制,减少对政策补贴的单一路径依赖。

6)加快完善面向需求响应与主动调控的V2G标准体系。标准缺失导致设备兼容性不足、数据互通存在壁垒,是制约规模化互动的关键瓶颈。需建立跨行业的标准协同机制,统筹车、桩、网各环节标准制定,组织跨行业力量加快V2G标准体系建设。重点推进接口协议、安全规范、调度规则的统一,为跨品牌、跨区域、多样化的互动形式提供基准,保障系统级调控的安全性与高效性。

5 结语

EV的规模化发展浪潮不仅重塑了交通领域的消费形态,更带来了全社会规模最大、分布最广的移动储能资源。V2G技术的探索与实践是激活这一资源价值的核心路径。EV的充放电行为仅是V2G的表象,其核心目标是支撑新型电力系统的高质量发展。通过灵活调节实现源荷平衡,通过双向互动促进新能源消纳,通过广域协同提升系统韧性,最终服务于双碳目标与能源结构转型。V2G必须立足于交通侧与电网侧的双重需求,既要适配不同主体的出行特征与运营规律,又要响应微网、配电网、主网在调压、调频、削峰填谷等方面的差异化目标。

V2G的规模化推进是涉及体制机制建设、组织推进、宣传动员等的系统工程,也是需要电网、充电

运营商、车企等多方协同的全产业链工程,更是面向广大车主行为的社会工程:在政策引领下,逐步完善激励机制与市场规则,促进市场成为资源配置的主导力量。持续开展技术创新,突破多层级关键瓶颈,构建跨行业、跨领域兼容互通的标准体系。唯有形成“政策-市场-技术-标准”的协同合力,才能破解当前用户参与度低、商业模式不清晰、系统价值难量化等现实困境。

展望未来,随着亿辆级EV时代的到来,V2G将充分释放其在新型电力系统中的价值,最终推动交通-能源系统形成绿色低碳、高效协同、安全可靠的可持续生态。

参考文献

- [1] 2025年全国机动车达4.69亿辆 驾驶人达5.59亿人[EB/OL]. [2026-03-26]. https://www.gov.cn/lianbo/202601/content_7056115.htm.
China's motor vehicles reach 469 million and drivers hit 559 million in 2025[EB/OL]. [2026-03-26]. https://www.gov.cn/lianbo/202601/content_7056115.htm.
- [2] 欧阳明高.中国新能源汽车未来10年周期性和结构性趋势展望[J].科技导报,2024,42(12):6-13.
OUYANG Minggao. Prospects for the cyclical and structural trends of China's new energy vehicles in the next ten years[J]. Science & Technology Review, 2024, 42(12): 6-13.
- [3] 新型电力系统发展蓝皮书编写组.新型电力系统发展蓝皮书[M].北京:中国电力出版社,2023.
Blue Book on New Power System Development Compilation Group. Blue book on new power system development [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [4] 黄学良,刘永东,沈斐,等.电动汽车与电网互动:综述与展望[J].电力系统自动化,2024,48(7):3-23.
HUANG Xueliang, LIU Yongdong, SHEN Fei, et al. Vehicle to grid: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3-23.
- [5] 裴振坤,王学梅,康龙云.电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J].电力系统自动化,2023,47(18):17-32.
PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 17-32.
- [6] 国家发展改革委办公厅.关于推动车网互动规模化应用试点工作的通知[EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202409/t20240910_1392926.html.
General Office of the National Development and Reform Commission. Notice on promoting the pilot work for large-scale application of vehicle-to-grid [EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202409/t20240910_1392926.html.
- [7] 国家发展改革委.关于加强新能源汽车与电网融合互动的实施意见[EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924347.htm.
- [8] 国家发展改革委办公厅.关于公布首批车网互动规模化应用试点的通知[EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202504/t20250402_1396958.html.
General Office of the National Development and Reform Commission. Notice on announcing the first batch of large-scale application pilots for vehicle-to-grid [EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202504/t20250402_1396958.html.
- [9] 杨卫东,辛耀中,郭王勇,等.车网互动的工程实施困境与对策建议[J/OL].电力系统自动化[2025-07-08].<https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250707.1638.004>.
YANG Weidong, XIN Yaozhong, GUO Wangyong, et al. Difficulties and countermeasures of vehicle-network interaction project implementation [J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2025-07-08]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250707.1638.004>.
- [10] 阮前途,陈赞,潘智俊.新型电力系统对实现沿海城市双碳目标贡献的探讨[J].电力系统自动化,2022,46(14):11-18.
RUAN Qiantu, CHEN Yun, PAN Zhijun. Discussion on contributions of novel power system to achieving carbon emission peak and carbon neutrality of coastal city [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 11-18.
- [11] LETCHER M, BRITTON J. The role of electric vehicle-to-X in net zero energy systems: a comprehensive review[J]. Energy Research & Social Science, 2025, 122: 104021.
- [12] 叶宇剑,吴奕之,胡健雄,等.城市电力-交通耦合系统的联合推演与协同优化:研究综述、挑战与展望[J].中国电机工程学报,2025,45(11):4144-4162.
YE Yujian, WU Yizhi, HU Jianxiong, et al. Joint prediction and coordinated optimization of integrated urban power distribution and transportation systems: literature review, challenges and prospects[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(11): 4144-4162.
- [13] SUDHAKAR A, MAHESH KUMAR B. Maximum exploitation of electric vehicle storage in smart micro grids with stochastic renewable sources [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 48: 104029.
- [14] 张强,曹铂苒,刘洪,等.适应光伏消纳的电动汽车-聚合商-配电网日前时空互动方法[J].电力系统自动化,2025,49(14):141-151.
ZHANG Qiang, CAO Boran, LIU Hong, et al. Day-ahead spatio-temporal interaction method of electric vehicles, aggregators and distribution network for photovoltaic accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(14): 141-151.
- [15] SEVDARI K, CALEARO L, ANDERSEN P B, et al. Ancillary services and electric vehicles: an overview from charging clusters and chargers technology perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112666.

- [16] KATAOKA R, OGIMOTO K, IWAFUNE Y, et al. Does BEV always help to reduce CO₂ emission? Impact of charging strategy [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, 129: 104124.
- [17] YAO X, FAN Y, ZHAO F, et al. Economic and climate benefits of vehicle-to-grid for low-carbon transitions of power systems: a case study of China's 2030 renewable energy target [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129833.
- [18] 谢仕伟,陈铠悦,张亚超,等.考虑需求弹性的电力-交通网络双层博弈模型——基于拟变分不等式[J].*中国电机工程学报*, 2024,44(6):2185-2196.
- XIE Shiwei, CHEN Kaiyue, ZHANG Yachao, et al. A two-layer game model for power-transportation coupled networks considering demand elasticity—based on quasi-variational inequalities[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(6): 2185-2196.
- [19] ZHANG Z Q, CHEN Z, GÜMRÜKCÜ E, et al. A nudge-based approach for day-ahead optimal scheduling of destination charging station with flexible regulation capacity [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(4): 8498-8512.
- [20] 戚佳金,黄久鸿,张良,等.考虑辅助服务奖励机制的电动公交车优化调度策略[J].*电力系统保护与控制*, 2025, 53(17): 25-36.
- QI Jiajin, HUANG Jiuhong, ZHANG Liang, et al. Optimal scheduling strategy for electric buses considering auxiliary service incentive mechanism [J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(17): 25-36.
- [21] 李一璞,周云,冯冬涵,等.考虑移动储能动态路径引导的配电网协同恢复策略[J].*电力自动化设备*, 2025, 45(5): 47-55.
- LI Yipu, ZHOU Yun, FENG Donghan, et al. Coordinated restoration strategy of distribution network considering dynamic path guidance of mobile energy storage [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(5): 47-55.
- [22] ZHAO P, ZHANG S J, SANTI P, et al. Challenges and opportunities in truck electrification revealed by big operational data[J]. *Nature Energy*, 2024, 9(11): 1427-1437.
- [23] 文欣,黄学良,高山,等.考虑区域差异性的电动私家车网格化充电需求预测[J].*电力系统自动化*, 2025, 49(7): 158-168.
- WEN Xin, HUANG Xueliang, GAO Shan, et al. Grid charging demand forecasting for private electric vehicles considering regional differences [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(7): 158-168.
- [24] CHEN Y Y, HU S, XIE S W, et al. Optimal dynamic pricing of fast charging stations considering bounded rationality of users and market regulation [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(4): 3950-3965.
- [25] 刘长石,陈慧璇,吴张.城市物流配送的混合车辆路径规划模型与优化算法[J].*控制与决策*, 2023, 38(3): 759-768.
- LIU Changshi, CHEN Huixuan, WU Zhang. Programming model and optimization algorithm for the mixed fleet vehicle routing problem in urban logistics distribution [J]. *Control and Decision*, 2023, 38(3): 759-768.
- [26] RIVERA S, GOETZ S M, KOURO S, et al. Charging infrastructure and grid integration for electromobility [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2023, 111(4): 371-396.
- [27] 程瑜,何知遥,胡紫豪,等.电动出租车专用分散式和集中式快充设施联合投资优化[J].*电工技术学报*, 2019, 34(增刊2): 664-673.
- CHENG Yu, HE Zhiyao, HU Zihao, et al. A joint optimized investment decision of electric taxis' dedicated decentralized and centralized fast-charging stations [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(S2): 664-673.
- [28] JI Z Y, HUANG X L. Plug-in electric vehicle charging infrastructure deployment of China towards 2020: policies, methodologies, and challenges [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90: 710-727.
- [29] 徐衍会,李冠霖.基于碱性-质子交换膜混合电解槽的离网型风光耦合制氢系统容量配置优化[J].*电力自动化设备*, 2025, 45(4): 1-9.
- XU Yanhui, LI Guanlin. Capacity configuration optimization of off-grid wind-solar coupling hydrogen production system based on alkaline-proton exchange membrane hybrid electrolyzers [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(4): 1-9.
- [30] 陈卓旭,胡泽春,鲍志远,等.大规模电动汽车充换电设施集总功率实时分解策略[J/OL].*电力系统自动化* [2025-08-05]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.tp.20250805.1107.004>.
- CHEN Zhuoxu, HU Zechun, BAO Zhiyuan, et al. Real-time decomposition strategy of lumped power of large-scale electric vehicle charging and replacing facilities [J/OL]. *Automation of Electric Power Systems* [2025-08-05]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.tp.20250805.1107.004>.
- [31] ZHANG Z Q, CHEN Z, XING Q, et al. Evaluation of the multi-dimensional growth potential of China's public charging facilities for electric vehicles through 2030 [J]. *Utilities Policy*, 2022, 75: 101344.
- [32] 玉少华,杜兆斌,陈丽丹,等.融合路网-电网信息的电动汽车充放电行为引导与调控策略[J].*电力系统自动化*, 2024, 48(7): 169-180.
- YU Shaohua, DU Zhaobin, CHEN Lidan, et al. Guidance and regulation strategy for charging and discharging behaviors of electric vehicles based on fusion of road network and power grid information [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(7): 169-180.
- [33] 茆美琴,葛星,杨铖,等.计及用户偏好的电动汽车集群参与调频市场优化控制[J].*电力系统自动化*, 2025, 49(14): 130-140.
- MAO Meiqin, GE Xing, YANG Cheng, et al. Optimal control of electric vehicle cluster participating in frequency regulation market considering user preferences [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(14): 130-140.
- [34] 马泽超,刘小明,王伟强,等.基于电动汽车仿真行程链的城市差异化充电设施规划实践[J/OL].*电力系统自动化* [2025-04-24]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250423.1356.002>.
- MA Zechao, LIU Xiaoming, WANG Weiqiang, et al. Planning practice of urban differentiated charging facilities based on electric vehicle simulation trip chain [J/OL]. *Automation of Electric Power Systems* [2025-04-24]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250423.1356.002>.
- [35] 孔令达,张波,韩晓娟,等.多类型充电设施车网融合互动同构

- 元模型[J/OL]. 中国电机工程学报[2025-09-25]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250225.1650.013>.
- KONG Lingda, ZHANG Bo, HAN Xiaojuan, et al. Research on interactive isomorphic meta-model of vehicle-grid with multi-type charging facilities[J/OL]. Proceedings of the CSEE[2025-09-25]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250225.1650.013>.
- [36] YU Q, WANG Z, SONG Y C, et al. Potential and flexibility analysis of electric taxi fleets V2G system based on trajectory data and agent-based modeling [J]. Applied Energy, 2024, 355: 122323.
- [37] 邢紫佩, 王守相, 梅晓辉, 等. 考虑电动汽车充放电全程功率变化率和用户舒适度的 V2H 调度策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 70-76.
- XING Zipei, WANG Shouxiang, MEI Xiaohui, et al. V2H scheduling strategy considering charging and discharging power change rate of electric vehicles and users' comfort level [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 70-76.
- [38] 余苏敏, 杜洋, 史一炜, 等. 考虑 V2B 智慧充电桩群的低碳楼宇优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 95-101.
- YU Sumin, DU Yang, SHI Yiwei, et al. Optimal scheduling of low-carbon building considering V2B smart charging pile groups [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 95-101.
- [39] 国家发展改革委 国家能源局关于有序推动绿电直连发展有关事项的通知[EB/OL]. [2025-09-25]. <https://www.nea.gov.cn/20250530/2d67a6e49c044f2eacabe1fdd48d20f/c.html>.
- Notice of the National Development and Reform Commission and National Energy Administration on matters relating to the orderly promotion of the development of direct connection of green electricity [EB/OL]. [2025-09-25]. <https://www.nea.gov.cn/20250530/2d67a6e49c044f2eacabe1fdd48d20f/c.html>.
- [40] 叶林, 裴铭, 杨建宾, 等. 极端天气下的新能源电力系统电力电量平衡体系[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(4): 2-18.
- YE Lin, PEI Ming, YANG Jianbin, et al. Electric power and energy balancing system for power system with renewable energy in extreme weather [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(4): 2-18.
- [41] V2G Hub [EB/OL]. [2026-01-25]. <https://www.v2g-hub.com/>.
- [42] LIU F, WEI Z Q, LIN Y, et al. Vehicle-to-grid technology acceptance for electric vehicle users: a systematic literature review and future research agenda [J]. International Journal of Consumer Studies, 2025, 49(3): e70065.
- [43] BAUMGARTNER N, WEYER K, ECKMANN L, et al. How to integrate users into smart charging: a critical and systematic review [J]. Energy Research & Social Science, 2023, 100: 103113.
- [44] United States Department of Energy. Vehicles-to-grid integration assessment report[EB/OL]. [2025-07-01]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-01/Vehicle_Grid_Integration_Assessment_Report_01162025.pdf.
- [45] ANDERSEN P B, TOGHROLJERDI, S H, SØRENSEN T M, et al. The Parker Project: final report[R]. Copenhagen, Denmark: Technical University of Denmark, 2019.
- [46] 华龙网.“光储充放检”协同创新示范 引领“绿色低碳”先锋之路[EB/OL]. [2025-07-23]. https://news.cqnews.net/1/detail/1212037068225351680/web/content_1212037068225351680.html.
- Hualong Net. Synergistic innovation demonstration of “integration of PV, storage, charging, discharging, and inspection” leads the pioneer path of “green and low-carbon” [EB/OL]. [2025-07-23]. https://news.cqnews.net/1/detail/1212037068225351680/web/content_1212037068225351680.html.
- [47] 晋城市人民政府门户网站. 5分钟便捷换电! 我市首座新能源重卡充换电一体站投用[EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.jcgov.gov.cn/dtxx/jcdt/202405/t20240509_1980090.shtml.
- Jincheng City People's Government Portal Website. 5 minute convenient battery swap! The first integrated charging and swap station for new energy heavy-duty trucks in our city put into operation [EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.jcgov.gov.cn/dtxx/jcdt/202405/t20240509_1980090.shtml.
- [48] 新华网山东频道. 济南起步区充换电示范站充电量超 200 万千瓦时[EB/OL]. [2025-07-23]. <http://sd.news.cn/20250417/ca815eedca3447d4acd9d225326b11/c.html>.
- Xinhua Net Shandong Channel. Charging volume of Jinan starting area charging and swap demonstration station exceeds 2 million kW·h [EB/OL]. [2025-07-23]. <http://sd.news.cn/20250417/ca815eedca3447d4acd9d225326b11/c.html>.
- [49] 经济日报. 我国首次省域范围内大规模车网互动应用实施——电动汽车变身“充电宝”[EB/OL]. [2025-07-23]. http://paper.ce.cn/pc/content/202408/19/content_299623.html.
- Economic Daily. China's first large-scale vehicle-to-grid application implemented at the provincial level-electric vehicles become “power banks” [EB/OL]. [2025-07-23]. http://paper.ce.cn/pc/content/202408/19/content_299623.html.
- [50] 苏州市人民政府. 全国首个换电虚拟电厂建成投运[EB/OL]. [2025-07-23]. <https://www.suzhou.gov.cn/szsrnzf/szyw/202503/a60985e397184d0c9fbfb424db962de1.shtml>.
- Suzhou Municipal People's Government. Nation's first battery swap virtual power plant built and put into operation [EB/OL]. [2025-07-23]. <https://www.suzhou.gov.cn/szsrnzf/szyw/202503/a60985e397184d0c9fbfb424db962de1.shtml>.
- [51] 中国科技网. 国网湖北电力项目入选国家首批车网互动规模化应用试点[EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-04/06/content_320436.html.
- China Science and Technology Net. State Grid Hubei Electric Power Project selected for the national first batch of large-scale application pilots for vehicle-to-grid [EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-04/06/content_320436.html.
- [52] 中国科技网. 国内首次基于“5G+量子”虚拟电厂精准调度车网互动规模化实测活动举办[EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-05/30/content_348501.html.
- Science and Technology Daily. China's first large-scale field test of precise vehicle-to-grid scheduling based on “5G+quantum” virtual power plant conducted [EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-05/30/content_348501.html.

- content_348501.html.
- [53] 中国能源报.南方电网公司开展全国规模最大车网互动[EB/OL]. [2025-07-23]. https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202504/07/content_30067398.html.
China Energy News. China Southern Power Grid conducts nation's largest vehicle-to-grid activity [EB/OL]. [2025-07-23]. https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202504/07/content_30067398.html.
- [54] 深圳市发展和改革委员会.7万度起步!开启车网互动国家试点“深圳加速度”[EB/OL]. [2025-07-23]. https://fgw.sz.gov.cn/zwgk/qt/gzdt/content/post_12254427.html.
Shenzhen Municipal Development and Reform Commission. Starting with 70 000 kW·h! Shenzhen accelerates national pilot for vehicle-to-grid [EB/OL]. [2025-07-23]. https://fgw.sz.gov.cn/zwgk/qt/gzdt/content/post_12254427.html.
- [55] 新华网.贵州首座“光储充放一体”全液冷超充站投运[EB/OL]. [2025-07-23]. <http://gz.news.cn/20250710/a70c067faa7e4a6a9d09a7000c5cd011/c.html>.
Xinhua Net. Guizhou's first all-liquid-cooled supercharging station with integrated PV, storage, charging and discharging put into operation [EB/OL]. [2025-07-23]. <http://gz.news.cn/20250710/a70c067faa7e4a6a9d09a7000c5cd011/c.html>.
- [56] 深圳市坪山区人民政府.深圳市坪山区落实“双碳”战略进一步推动新能源产业高质量发展的若干措施[EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.szpsq.gov.cn/zwgk/gfxwj/qgfwj/content/post_12264577.html.
The People's Government of Pingshan District, Shenzhen. Several measures of Pingshan District, Shenzhen for implementing the “dual carbon” strategy and further promoting the high-quality development of the new energy industry [EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.szpsq.gov.cn/zwgk/gfxwj/qgfwj/content/post_12264577.html.
- [57] 南京市交通运输局.南京市2024年度充电设施建设运营市级财政补贴办法[EB/OL]. [2025-09-26]. https://nqt.nanjing.gov.cn/nqtmh/njyst/pages/policy_artical.html?policyguid=F7CA1D50-81B9-40E9-BAB7-1A5E52DF934C.
Nanjing Municipal Transportation Bureau. Measures for municipal fiscal subsidies for the construction and operation of charging facilities in Nanjing (2024) [EB/OL]. [2025-09-26]. https://nqt.nanjing.gov.cn/nqtmh/njyst/pages/policy_artical.html?policyguid=F7CA1D50-81B9-40E9-BAB7-1A5E52DF934C.
- [58] 海南省发展改革委.关于印发《海南省电动汽车充电基础设施建设运营补贴工作流程》的函[EB/OL]. [2025-09-26]. <https://baoting.hainan.gov.cn/zfxgk/xgbmgk/kjgyxxy/gkml/202105/P020210528606225374642.pdf>.
Hainan Provincial Development and Reform Commission. Letter on issuing the “Work Procedures for the Construction, Operation, and Subsidies of Electric Vehicle Charging Infrastructure in Hainan Province” [EB/OL]. [2025-09-26]. <https://baoting.hainan.gov.cn/zfxgk/xgbmgk/kjgyxxy/gkml/202105/P020210528606225374642.pdf>.
- [59] 广州市人民政府.广州市推动智能网联新能源汽车产业发展三年行动计划[EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.gz.gov.cn/zwgk/fggw/sfbgtwj/content/post_10322829.html.
Guangzhou Municipal People's Government. Three-year action plan for promoting the development of the intelligent connected and new energy vehicle industry in Guangzhou [EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.gz.gov.cn/zwgk/fggw/sfbgtwj/content/post_10322829.html.
- [60] 合肥市人民政府.推动智能网联新能源汽车产业高质量发展若干政策[EB/OL]. [2025-09-26]. <https://www.baohe.gov.cn/public/13771/111237664.html>.
Hefei Municipal People's Government. Policies for promoting high-quality development of the intelligent connected and new energy vehicle industry [EB/OL]. [2025-09-26]. <https://www.baohe.gov.cn/public/13771/111237664.html>.
- [61] 上海市发展和改革委员会.上海市新型电力系统调节能力奖励资金管理办法[EB/OL]. [2025-09-26]. https://fgw.sh.gov.cn/fgw_gfxwj/20250519/463852516eb64060b6962fb68c2b75fb.html.
Shanghai Municipal Development and Reform Commission. Administrative measures for the reward funds for regulating capacity of the new-type power system in Shanghai [EB/OL]. [2025-09-26]. https://fgw.sh.gov.cn/fgw_gfxwj/20250519/463852516eb64060b6962fb68c2b75fb.html.
- [62] 杭州日报.全省首推!杭州出台迎峰度夏新政策[EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.hangzhou.gov.cn/art/2025/7/1/art_812269_59114605.html.
Hangzhou Daily. Province's first! Hangzhou introduces new policy for peak summer period [EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.hangzhou.gov.cn/art/2025/7/1/art_812269_59114605.html.
- [63] 成都市经济和信息化局.关于进一步增强成都市电力保障能力的若干政策措施相关奖补实施细则[EB/OL]. [2025-09-26]. https://cdjx.chengdu.gov.cn/cdsjxw/c132904/2025-05/27/content_0cce3a018d0246c4a583808bd7fbf5d4.shtml.
Chengdu Municipal Bureau of Economy. Implementation rules for awards and subsidies related to measures for further enhancing the power security capability of Chengdu City [EB/OL]. [2025-09-26]. https://cdjx.chengdu.gov.cn/cdsjxw/c132904/2025-05/27/content_0cce3a018d0246c4a583808bd7fbf5d4.shtml.
- [64] 四川省发展和改革委员会.关于明确成都市车网互动试点项目放电上网电价有关事项的通知[EB/OL]. [2025-09-26]. <https://cdjx.chengdu.gov.cn/gkml/xzgfxwj/1376939302100926464.shtml>.
Sichuan Provincial Development and Reform Commission. Notice on relevant matters concerning the feed-in tariff for discharging from vehicle-to-grid pilot projects in Chengdu [EB/OL]. [2025-09-26]. <https://cdjx.chengdu.gov.cn/gkml/xzgfxwj/1376939302100926464.shtml>.
- [65] 广东省发展和改革委员会.关于新能源汽车向电网放电上网电价问题的批复[EB/OL]. [2025-09-26]. https://drc.gd.gov.cn/ywtz/content/post_4710468.html.
Guangdong Provincial Development and Reform Commission. Official reply on the feed-in tariff for new energy vehicles discharging to the power grid [EB/OL]. [2025-09-26]. https://drc.gd.gov.cn/ywtz/content/post_4710468.html.
- [66] 江苏省发展和改革委员会.关于优化工商业分时电价结构促

- 进新能源消纳降低企业用电成本支持经济社会发展的通知[EB/OL]. [2025-09-26]. https://fgw.nanjing.gov.cn/njsfzhggwyh/202505/t20250506_5140665.html.
- Jiangsu Provincial Development and Reform Commission. Notice on optimizing the time-of-use electricity pricing structure for industrial and commercial users to promote renewable energy consumption, reduce enterprise electricity costs, and support economic and social development [EB/OL]. [2025-09-26]. https://fgw.nanjing.gov.cn/njsfzhggwyh/202505/t20250506_5140665.html.
- [67] 山东省发展和改革委员会, 国家能源局山东监管办公室, 山东省能源局. 关于开展车网互动价格机制改革试点工作的通知[EB/OL]. [2025-09-26]. http://fgw.shandong.gov.cn/art/2025/1/6/art_91687_10456708.html.
- Shandong Provincial Development and Reform Commission, Shandong Energy Regulatory Office of the National Energy Administration, Shandong Provincial Energy Bureau. Notification on launching the pilot program for vehicle-to-grid pricing mechanism reform[EB/OL]. [2025-09-26]. http://fgw.shandong.gov.cn/art/2025/1/6/art_91687_10456708.html.
- [68] SPERSTAD I B, DEGEFA M Z, KJØLLE G. The impact of flexible resources in distribution systems on the security of electricity supply: a literature review [J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 188: 106532.
- [69] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(4): 1-10.
- HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(4): 1-10.
- [70] 潘美琪, 贺兴, 艾芊, 等. 新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望[J]. *电网技术*, 2024, 48(3): 933-948.
- PAN Meiqi, HE Xing, AI Qian, et al. Research status and prospect of distributed energy resource dispatching in new distribution system[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 933-948.
- [71] MAO D, TAN J, WANG J K. Location planning of PEV fast charging station: an integrated approach under traffic and power grid requirements [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(1): 483-492.
- [72] 凡航, 徐葳, 范晓昱, 等. 隐私计算在新型电力系统中的应用分析与展望[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(19): 187-199.
- FAN Hang, XU Wei, FAN Xiaoyu, et al. Application analysis and prospect of privacy-preserving computation in new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(19): 187-199.
- [73] URIBE-PÉREZ N, GONZALEZ-GARRIDO A, GALLARRETA A, et al. Communications and data science for the success of vehicle-to-grid technologies: current state and future trends[J]. *Electronics*, 2024, 13(10): 1940.
- [74] GONCEARUC A, DE CAUWER C, SAPOUNTZOGLU N, et al. The barriers to widespread adoption of vehicle-to-grid: a comprehensive review[J]. *Energy Reports*, 2024, 12: 27-41.
- [75] RAZZAQUE M A, KHADEM S K, PATRA S, et al. Cybersecurity in vehicle-to-grid (V2G) systems: a systematic review[J]. *Applied Energy*, 2025, 398: 126364.
- [76] WAN M C, YU H Y, HUO Y N, et al. Feasibility and challenges for vehicle-to-grid in electricity market: a review[J]. *Energies*, 2024, 17(3): 679.
- [77] 中国能源报. 车网互动技术推广难在哪?[EB/OL]. [2025-07-30]. https://www.cnenergynews.cn/peixun/2022/02/16/detail_20220216117614.html.
- China Energy News. What are the barriers to vehicle-to-grid technology promotion[EB/OL]. [2025-07-30]. https://www.cnenergynews.cn/peixun/2022/02/16/detail_20220216117614.html.
- [78] LEHTOLA T. Vehicle-to-grid applications and battery cycle aging: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 208: 115013.
- [79] RAO S P, OLUSEGUN T S, RANGANATHAN P, et al. Vehicle-to-grid technology: opportunities, challenges, and future prospects for sustainable transportation [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 110: 114927.
- [80] VAN HEUVELN K, GHOTGE R, ANNEMA J A, et al. Factors influencing consumer acceptance of vehicle-to-grid by electric vehicle drivers in the Netherlands[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2021, 24: 34-45.
- [81] CHEN C F, LAI C M. Understanding the acceptance of vehicle-to-grid (V2G) services: evidence from Taiwan [J]. *Transport Policy*, 2024, 159: 230-240.
- [82] ZHANG C Q, KITAMURA H, GOTO M. Behavioral insights into vehicle-to-grid (V2G) adoption: beyond economic perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 228: 116603.
- [83] International Electrical Committee. Electric vehicle conductive charging system-Part 1: general requirements: IEC 61851-1—2017[S]. 2017.
- [84] 李立理, 张剑, 刘雨薇, 等. 美国加州车网互动政策、标准与市场机制最新进展及其启示[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(7): 38-46.
- LI Lili, ZHANG Jian, LIU Yuwei, et al. Latest development and enlightenment of vehicle to grid policy, standards and market mechanisms in California, USA [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(7): 38-46.
- [85] Road vehicles: vehicle to grid communication interface-Part 20: 2nd generation network layer and application layer requirements: ISO 15118-20 [S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2022.
- [86] Open Charge Alliance. Open charge point protocol (OCPP) 2.1 [EB/OL]. [2025-09-26]. <https://openchargealliance.org/protocols/open-charge-point-protocol/>.
- [87] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 非车载传导式充电机与电动汽车之间的数字通信协议: GB/T 27930—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Digital communication protocols between off-board conductive charger and electric vehicle: GB/T 27930—2023 [S]. Beijing:

- Standards Press of China, 2023.
- [88] 电动汽车充换电服务信息交换: T/CEC 102.1-102.10—2021 [S]. 2021.
Electric vehicle charging and swapping service information exchange: T/CEC 102.1-102.10—2021[S]. 2021.
- [89] 吴洋, 王钢, 汪隆君, 等. 基于用户画像的电动汽车用户参与 AGC 服务激励定价策略[J/OL]. 电力系统自动化[2025-09-27]. <https://doi.org/10.7500/AEPS20241104002>.
WU Yang, WANG Gang, WANG Longjun, et al. User profile based incentive pricing strategy for electric vehicle users participating in AGC service [J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2025-09-27]. <https://doi.org/10.7500/AEPS20241104002>.
- [90] 李青, 刘雨婷, 刘超. 考虑用户有限理性的电动汽车充放电行为时空特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(15): 83-94.
LI Qing, LIU Yuting, LIU Chao. Spatiotemporal analysis of electric vehicle charging and discharging behavior considering users' bounded rationality [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 83-94.
- [91] YENDURI G, RAMALINGAM M, SELVI G C, et al. GPT (generative pre-trained transformer)—a comprehensive review on enabling technologies, potential applications, emerging challenges, and future directions [J]. IEEE Access, 2024, 12: 54608-54649.
- [92] WANG L, ZHANG J S, YANG H, et al. User behavior simulation with large language model-based agents [J]. ACM Transactions on Information Systems, 2025, 43(2): 1-37.
- [93] ZHANG L, HU Y X, LI W H, et al. LLM-AIDSim: LLM-enhanced agent-based influence diffusion simulation in social networks [J]. Systems, 2025, 13(1): 29.
- [94] ZHANG E H, WANG X Z, GONG P Y, et al. USimAgent: large language models for simulating search users [C]// Proceedings of the 47th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, July 14- 8, 2024, Washington D.C., USA: 2687-2692.
- [95] MO B C, XU H Y, MA R Y, et al. Large language models for travel behavior prediction [EB/OL]. [2025-08-01]. <https://arxiv.org/abs/2312.00819>.
- [96] WANG L Z, DUAN P B, HE Z B, et al. Agentic large language models for day-to-day route choices [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2025, 180: 105307.
- [97] LIU T M, YANG J R, YIN Y F. Toward LLM-agent-based modeling of transportation systems: a conceptual framework [EB/OL]. [2025-09-01]. <https://arxiv.org/abs/2412.06681>.
- [98] YAGHOUBI E, YAGHOUBI E, KHAMEES A, et al. A systematic review and meta-analysis of machine learning, deep learning, and ensemble learning approaches in predicting EV charging behavior [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 135: 108789.
- [99] REDA M, ONSY A, HAIKAL A Y, et al. Path planning algorithms in the autonomous driving system: a comprehensive review [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2024, 174: 104630.
- [100] MANSOUR SAATLOO A, MEHRABI A, MARZBAND M, et al. Hierarchical user-driven trajectory planning and charging scheduling of autonomous electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1736-1749.
- [101] ALZUBAIDI L, ZHANG J L, HUMAIDI A J, et al. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions [J]. Journal of Big Data, 2021, 8(1): 53.
- [102] ZHANG Z Q, CHEN Z, GÜMRÜKCÜ E, et al. Advancing urban electric vehicle charging stations: AI-driven day-ahead optimization of pricing and Nudge strategies utilizing multi-agent deep reinforcement learning [J]. eTransportation, 2024, 22: 100352.
- [103] LI J H, WANG H. A multi-view multi-timescale hypergraph-empowered spatiotemporal framework for EV charging forecasting [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2026, 17(2): 1430-1443.
- [104] ORFANOUDAKIS S, ROBU V, SALAZAR E M, et al. Scalable reinforcement learning for large-scale coordination of electric vehicles using graph neural networks [J]. Communications Engineering, 2025, 4: 118.
- [105] YANG G X, ZHANG H, QIU L. Graph-based multi-agent reinforcement learning with an enriched environment for joint ride-sharing and charging optimization [J]. Applied Energy, 2026, 405: 127220.
- [106] 盛裕杰, 郭庆来, 薛屹洵, 等. 信息-物理-社会视角下的电力-交通耦合网络建模与协同优化 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 62-85.
SHENG Yujie, GUO Qinglai, XUE Yixun, et al. Collaborative modeling and optimization of power-transportation coupling network from cyber-physical-social perspective [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 62-85.
- [107] JIN L C, ZHAI X Y, WANG K, et al. Big data, machine learning, and digital twin assisted additive manufacturing: a review [J]. Materials & Design, 2024, 244: 113086.
- [108] WANG Z R, GUPTA R, HAN K, et al. Mobility digital twin: concept, architecture, case study, and future challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(18): 17452-17467.
- [109] E.ON. Digital grids-smart technology for a sustainable energy future [EB/OL]. [2026-01-25]. <https://www.eon.com/en/energy-grids/digital-grids.html>.
- [110] 节能与新能源汽车技术路线图3.0编写组. 节能与新能源汽车技术路线图3.0 [M]. 北京: 中国汽车工程学会, 2025.
Energy-saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap 3.0 Compilation Group. Energy-saving and new energy vehicle technology roadmap 3.0 [M]. Beijing: China Society of Automotive Engineers, 2025.
- [111] 国家能源局. 我国中长期发电能力及电力需求发展预测 [EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.nea.gov.cn/2013-02/22/c_132185515.htm.

- National Energy Administration. Development forecast of China's medium- and long-term power generation capacity and electricity demand [EB/OL]. [2025-09-26]. https://www.nea.gov.cn/2013-02/22/c_132185515.htm.
- [112] 习近平. 践诺笃行 共同书写全球气候治理新篇章——在联合国气候变化峰会上的致辞(2025年9月24日)[EB/OL]. [2025-09-29]. http://www.news.cn/2025-09/25/c_1131999999.htm.
- XI Jinping. Keeping promises and acting faithfully: jointly writing a new chapter in global climate governance-address at the United Nations Climate Change Summit (September 24, 2025) [EB/OL]. [2025-09-29]. http://www.news.cn/2025-09/25/c_1131999999.htm.
- [113] 汤广福. 加快构建新型能源体系支撑保障国家能源安全[J]. 中国电力企业管理, 2023(13): 21-25.
- TANG Guangfu. Accelerating the development of a new energy system to support and safeguard national energy security [J]. China Power Enterprise Management, 2023(13): 21-25.
- 黄学良(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电动汽车与电网互动技术、分布式发电及其接入电网、智能用电技术、无线电能传输技术。E-mail: xlhuang@seu.edu.cn
- 刘永东(1969—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 电动汽车充换电设施建设与发展, 包括充换电设施标准体系、政策研究、交通与电力融合等。E-mail: liuyongdong@cec.org.cn
- 张梓麒(1994—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向: 车网互动、大模型在物理-社会融合系统中的应用。E-mail: zhangziqui@nnu.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

Vehicle-to-Grid for Large-scale Applications: Practical Progress, Key Bottlenecks, and Technical Pathways

HUANG Xueliang¹, LIU Yongdong², ZHANG Ziqi³, GONG Chengming⁴, GAO Shan¹, YAO Hanyi¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China; 2. Standardization Center, China Electricity Council, Beijing 100761, China; 3. NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 4. DERI-TELD Energy Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract: The strategic value of large-scale electric vehicles (EVs) in new power systems has been widely recognized. Serving as a critical connector for deep integration between transportation and energy systems, vehicle-to-grid (V2G) has been launched in multiple pilot projects nationwide. However, its large-scale deployment is hindered by systematic bottlenecks. From the integrated transportation-energy perspective, this paper first focuses on core features of V2G for facilitating the development of new power systems in diverse scenarios and systematically summarizes practical benefits from typical pilot practices. Then, core limitations to large-scale V2G deployment are clarified from six dimensions covering planning, equipment, platforms, mechanisms, users and standards. Finally, a systematic innovation framework is proposed, and cutting-edge research directions such as user behavior profiling driven by large models, transportation-energy system synergy, and digital twin platforms are explored. The long-term vision of V2G is envisioned, and phased technical paths and policy recommendations are proposed, aiming to provide theoretical support and practical guidance for the high-quality and large-scale development of V2G.

This work is supported by Special Fund Project for Scientific and Technological Innovation of Carbon Peaking and Carbon Neutrality in Jiangsu Province (No. BE2022030-2).

Key words: electric vehicle (EV); vehicle-to-grid (V2G); new power system; pilot; large-scale application; transportation-energy system synergy; digital twin; technical pathway

