

车网互动技术研究进展及规模化应用展望

黄玉萍^{1,2,3}, 张天任^{1,2,3}, 杨维佳^{2,3}, 余雪玲^{2,3}, 赵黛青^{2,3}, 陈勇^{2,3*}

(1. 中国科学技术大学能源与科学技术学院, 合肥 230026; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;
3. 广东省可再生能源重点实验室, 广州 510640)

摘要: 随着新能源汽车加速渗透、交通-能源融合纵深推进, 车网互动(V2G)成为挖掘“车-桩/站场”系统灵活性资源、支撑新型电力系统建设的重要技术途径。本文梳理了V2G基础设施及技术应用现状, 涉及充电基础设施、V2G平台技术体系与数据安全、V2G示范应用以及相应的国际进展与经验等; 从双向充电桩、动力电池充放电安全管理、信息通信与隐私保护等硬件设备, 电动汽车灵活性资源聚合与建模、“车-桩/站场”一体化运行调度优化、“桩/站场-配电网”协同控制与联合调度、场站选址与容量规划优化、绿色园区与分布式能源系统协同运行等资源管理调控, 关键技术布局与创新趋势等方面总结了V2G关键技术研究进展。在研判车端电池寿命与安全约束、桩端互联互通与性能短板、网端数据支撑与市场机制薄弱等V2G规模化应用挑战的基础上, 阐述了V2G规模化发展的分阶段路径, 凝练了人工智能驱动的资源优化利用、交通-能源融合系统协同优化运行两大关键技术。提出了构建智能互联和统一标准的基础设施体系、聚焦关键技术攻关与示范应用、强化数据安全治理与系统韧性保障、健全市场规则和商业模式、构建跨部门协同的政策合力机制等发展建议, 为V2G技术研究深化、规模化应用落地提供理论支撑与决策参考。

关键词: 车网互动; 充电基础设施; 灵活性资源; 管理调控; 新型电力系统

中图分类号: TK0 **文献标识码:** A

Vehicle-to-Grid Interaction Technology: Research Progress and Prospects for Large-Scale Application

Huang Yuping^{1,2,3}, Zhang Tianren^{1,2,3}, Yang Weijia^{2,3}, Yu Xueling^{2,3},
Zhao Daiqing^{2,3}, Chen Yong^{2,3*}

(1. School of Energy Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With the popularization of new energy vehicles and the advancement of transportation-energy integration, vehicle-to-grid (V2G) interaction has become an important technological pathway for tapping the flexible resources of vehicle-pile/station systems and for supporting the construction of new-type power systems. This study reviews the status of V2G infrastructure and applications, involving charging infrastructure, V2G platform technology systems and data security, V2G demonstration applications, and related international progress and experience. It also summarizes the research progress of key V2G technologies from there perspectives:

收稿日期: 2025-08-30; **修回日期:** 2025-12-08

通讯作者: *陈勇, 中国科学院广州能源研究所研究员, 中国工程院院士, 研究方向为能源战略、数字能源等;

E-mail: chen Yong@ms.giec.ac.cn.

资助项目: 国家自然科学基金项目(52407152); 中国工程院咨询项目“新时代广东省能源高质量发展战略研究”(2024-GD-5); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515012372); 广东省新型电力系统技术创新研究项目(1688533517621)

本刊网址: sscacae.engineering.org.cn

hardware devices, resource management and regulation, and key technology layout and innovation trends. Specifically, the research progress regarding hardware devices involves bidirectional charging piles, power battery charge/discharge safety management, as well as information communication and privacy protection. The research progress in terms of resource management and regulation includes (1) flexible resource aggregation and modeling of electric vehicles, (2) optimization of integrated vehicle–pile/station operation and dispatching, (3) coordinated control and joint dispatching between piles/stations and power distribution grids, (4) station siting and capacity planning optimization, and (5) coordinated operation of green parks and distributed energy systems. Additionally, challenges faced by large-scale V2G deployment are clarified, including battery life and safety constraints on the vehicle side, interoperability and performance shortcomings on the pile side, and inadequate data support and market mechanisms on the grid side. Based on this, the study elaborates on a phased development pathway for large-scale V2G deployment and identifies two key technologies: AI-driven optimal utilization of resources and coordinated operation of transportation–energy integrated systems. Finally, it proposes the following recommendations: (1) building an intelligent, interconnected, and standardized infrastructure system; (2) emphasizing key technological breakthroughs and demonstration applications; (3) strengthening data security governance and system resilience; (4) improving market rules and business models; and (5) establishing cross-sector policy coordination mechanisms, thereby providing theoretical support and decision-making references for deepening V2G research and enabling its large-scale deployment.

Keywords: vehicle-to-grid (V2G) interaction; charging infrastructure; flexible resources; management control; new-type power system

一、前言

车网互动（V2G）是推动能源与交通系统协同转型、支撑新型电力系统建设、助力实现“双碳”目标的重要技术路径，以电动汽车作为分布式储能单元，通过电池管理、双向通信、智能调度、需求侧管理等手段，实现电动汽车与电网之间的可控充放电，进而参与电网调峰和调频、增强电网对新能源的消纳能力^[1]。我国新能源汽车产业快速发展，纯电动汽车保有量超过 2.5×10^7 辆，充电基础设施超过 1.8×10^7 台^[2]，为V2G规模化应用提供了坚实基础。世界资源研究所预测，2030年的全社会电动汽车在理想情况下将提供储能容量730 GW，相当于2018年中国储能装机总规模的23倍^[2]，体现出电动汽车作为可调节负荷与灵活电源的极大潜力。

近年来，国家层面发布了《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》《关于加强新能源汽车与电网融合互动的实施意见》（2023年）、《关于推动车网互动规模化应用试点工作的通知》（2024年）等政策文件，明确了我国V2G的发展方向，为相关技术研发与产业探索提供了顶层指引^[3-5]。也在政策层面将新能源汽车与能源融合、智能有序充电、“源网荷储”一体化等纳入国家能源转型战略，以地方试点和参与主体多元的方式协同推进，并将虚拟电厂、聚合商等新兴业态纳入电力辅助服务市场，为V2G资源的可观、可控、可调以及规模化利用确立了基础条件。在新型电力系统快速建设的背景下，V2G从单一充电桩设施建设转向“设施+机制+技术”系统推进，通过完善分时电价、探索电

碳市场联动、推进配电网智能化等举措，不断拓宽V2G的价值实现路径，使电动汽车从传统的“被动负荷”向新型的“主动调节资源”“分布式储能单元”转型，为车网融合规模化发展提供了制度支撑。

需要指出的是，发展V2G仍面临系统性挑战，制约了灵活性资源的规模化和经济性利用。例如，V2G基础设施处于起步阶段，存在放电技术标准不统一、“车–桩–网”软硬件协同控制能力不足的情况；在运营机制层面，跨主体数据壁垒现象突出，市场机制与收益分配模式不够健全；在技术应用层面，大功率充电的普及与局部电网承载力不足的矛盾凸显。与此同时，既有研究对V2G复杂系统的剖析尚显不足，或侧重技术标准等单一维度的梳理，或聚焦局部技术脉络与特定场景的应用总结，而未能将基础设施的协同部署、运营机制的一体化设计、跨环节的价值链重构等纳入统一框架中进行分析^[6,7]。这就导致对“车–桩–网”全链路协同瓶颈的认知碎片化，不足以支撑V2G规模化发展的顶层设计与路径规划。为此，亟需梳理V2G灵活性资源的技术与应用进展，构思支撑产业化应用的关键技术突破方向，完善商业模式与政策保障要点，推动电动汽车移动储能资源与电网固定调节能力的高效对接，提升电网调节能力并增强配电网的经济性和安全稳定性，促进绿色能源和新能源产业链的高质量发展。

本文立足经济社会发展对V2G的宏观需求与新型电力系统建设背景，分析V2G灵活性资源开发面临的技术、机制、产业等维度的挑战，提出以V2G灵活性资源利用为核心的发展架构、关键技术路

径、保障体系发展建议，为推动V2G规模化发展、提升能源与交通系统协同效能提供参考。

二、车网互动基础设施及技术应用现状

V2G规模化发展依赖“车-桩-网”协同的复杂技术体系，需要相关基础设施的有效支撑（见图1），如实现能量双向交互的硬件设备（双向充电桩、车载电池、电网接口等），支持智能调度与市场交易的软件平台及数据系统。系统梳理基础设施布局、平台技术体系、示范应用方面的发展现状，是评估V2G规模化应用基础、识别系统发展瓶颈、规划未来发展路径的重要前提。

（一）充电基础设施建设现状

根据安装场所和使用需求，充电桩可分为私人充电桩、公共充电桩、专用充电桩3类。近年来，我国充电基础设施规模持续扩大，尤其是私人充电桩增速较快^[8]。2015—2023年，公共充电桩占比由87.7%下降至31.8%，私人充电桩的年均增速较公共充电桩提高65.8%（见图2）。不同类型的充电设施因电气特性和运行模式存在差异，对电网负荷分布及资源配置产生了不同程度的影响。

以广东省为例，充电基础设施呈现“总量领先、结构多元、功能多元”的发展特点。2024年，全省的充电桩总量为 1.6×10^6 台，车桩比约为3:1；预计2030年的公共与私人充电桩总数将增长至近 7×10^6 台。充电基础设施具有多元化的结构分布，体现在地区、类型、技术3个维度。①在地区结构上，珠江三角洲地区集中了全省约70%的公共充电

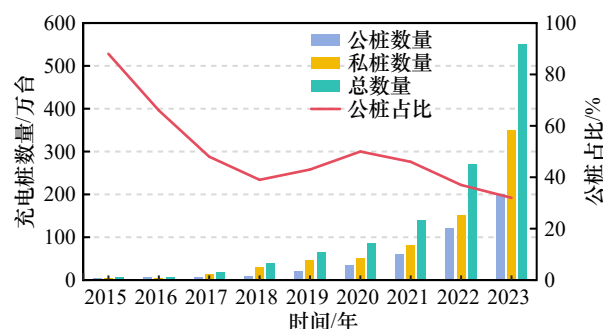


图2 我国车桩结构变化趋势

桩，广州市、深圳市中心城区的分布密度分别为15台/ km^2 、18台/ km^2 ，支撑了超过 2×10^6 辆电动汽车的充电需求；粤东西北地区的平均分布密度仅为2.3台/ km^2 ，表明区域间的基础设施覆盖水平存在差距，形成核心区高度集聚、外围区相对稀疏的格局^[9,10]。②在类型结构上，私人充电桩、公共充电桩、专用充电桩同步发展，其中私人充电桩使用便利性高、易于推广共享。③在技术结构上，公共充电桩以直流快充为主导（占比约为65%），单桩功率普遍为60~120 kW。

从功能演进角度看，充电设施从单一的电能补给点向电网互动节点、综合能源终端转型。一方面，技术能力快速提升，具备V2G双向充放电功能的设备占比提升至5%，部分V2G桩双向功率可调范围达50 kW，电网频率调节响应时间缩短至10 s以内，基本满足电力辅助服务的技术要求^[11,12]。另一方面，应用模式有效拓展，V2G桩可响应电网调峰、调频、备用等辅助服务需求，支持双向能量调度。例如，广州市虚拟电厂管理平台接入用户2026户（含大用户、负荷聚合商162家），签约最大可调节能力为1346 MW，实时可用响应能力约为98 MW，验证了规模化V2G资源的调度潜力。

此外，充电桩互联互通能力持续增强。在国家标准的推动下，充电接口、通信协议、数据格式正在趋于统一^[13]。在多家运营商接入区域级充电平台后，跨平台认证、结算协同能力不断提高，部分地区的充电桩数据集成与共享能力获得提升，为V2G资源统筹与优化提供了基础条件。

（二）车网互动平台技术体系与数据安全

1. V2G平台架构与功能

实施V2G需要以层次清晰、协同运作的技术体

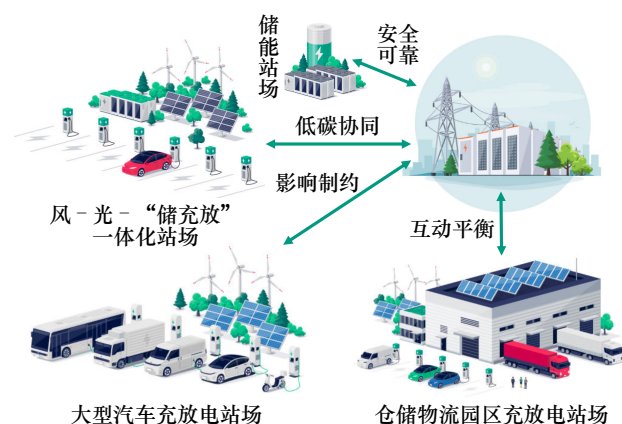


图1 “车-桩-网”互联互通的基本特征

系为支撑。相应技术体系可划分为3个一级技术层级：市场与应用层，负责与电力市场对接，支持资源的价值发现与交易决策；平台与数据层，作为中枢发挥资源聚合、智能调度、数据管理、安全核心等功能；物理设备层，涵盖车、桩、站、网等终端，支持能量的双向转换与状态执行。V2G平台是这一技术体系的具体表现形式，采用贯通3个技术层级的架构设计，实施“车-桩-网”高效协同与智能调度（见图3）。在相关技术体系框架下，可进一步划分出V2G调控、V2G装备与系统、市场交易决策支持、充放电安全防护、共性支撑技术等5个二级技术领域（分别嵌入并服务不同的一级技术层级）。

从平台架构的角度细分为设备运行层、负荷聚合层、调度交易层三部分，各层级通过信息流与能

量流的协同进行互动管理（见表1）；设计分工与协作机制，确保从终端感知到大规模调度的全流程智能化管理，提升V2G的效率和系统的安全稳定性。

① 设备运行层涉及充电负荷与调节能力预测、大规模电动汽车聚合调控等技术，涵盖电动汽车、电池管理系统（BMS）、充电设备（如有序充电设备和V2G双向充电设备）、充电站、换电站、“光储充放”一体站等终端设备。通过BMS与充电桩，电动汽车可以实时监测电池状态（如荷电状态（SOC）、健康状况、温度等）并将数据上传至平台。② 负荷聚合层集成有序充电调控平台、充放电聚合调控平台等，汇聚下游设备的负荷信息并进行统一的数据处理和调度优化，向更上层的电网管理与调度系统反馈聚合信息。聚合平台之间通过

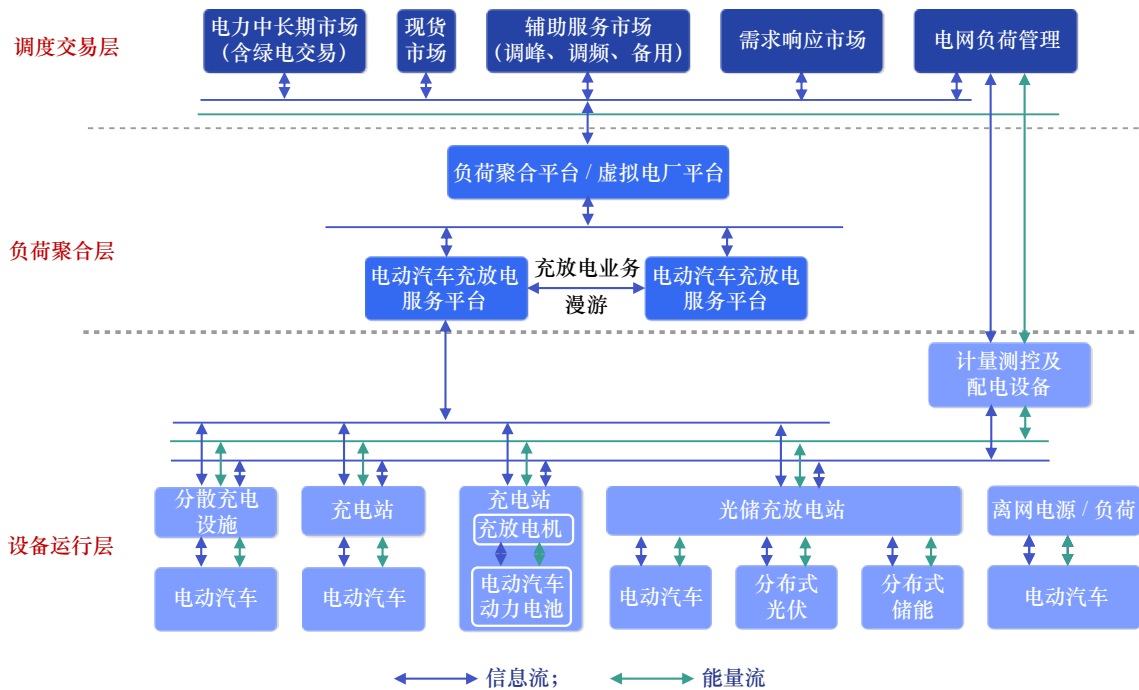


图3 V2G系统架构与能量-信息交互

表1 V2G技术架构分层体系及其应用阶段

技术架构层级	二级技术板块	三级技术	应用阶段
负荷聚合层	V2G 调控	负荷预测 / 调控 / 有序充电、V2G 调度	V0G、V1G、V2G、VGI
设备运行层	设备与系统	场站互联、充电终端进化、充放电功率匹配	V1G、V2G、VGI
调度交易层	市场交易支撑	聚合与市场信号对接、补贴核算、价格决策、投标组合	V1G、V2G、VGI
负荷聚合层和设备运行层	安全防护	异常检测告警、电池安全协同、跨平台数据安全流转	V1G、V2G、VGI
三层皆有	共性支撑	平台架构、数据安全标准	V0G、V1G、V2G、VGI

注：V0G表示无互动充电；V1G表示单向有序充电；VGI表示车网一体化互动，是V2G的高级形态，强调电动汽车与电网在能量、信息、服务层面实现深度耦合与协同优化，是未来交通与能源系统融合的重要方向。

ISO 15118 协议等标准化接口进行通信,支持身份认证、控制指令下达。身份认证依托车端与桩端的互联互通机制,身份识别系统通过设备唯一标识并与动态密钥配合,提高电动汽车充电过程的认证安全性与效率^[14]。③ 调度交易层作为最上层,发挥有序充放电补贴核算、互动响应量化计算、参与市场投标决策等功能,与电力市场(如电力辅助服务市场和现货市场等)、电网调度中心对接。基于电网实时运行需求,形成并下达各类交易调度指令,调节电动汽车充放电行为,优化电力负荷与交易价格,促进区域内电力保供和新能源就地消纳。基于调峰定价的区域电网优化调度,为开展电动汽车灵活性资源与电网之间的协同优化、提高系统响应能力与安全性等提供了解决方案^[15,16]。

2. V2G 平台数据管理与安全

V2G 平台的数据管理围绕信息流、能量流两方面展开。信息流涵盖车辆状态、电池状态、“车-桩-网”负荷、能量交互、市场信号等方面数据的采集、传输、处理与存储。能量流涉及车辆在并网状态下的充放电功率调控与各阶段的能量优化、在聚合商或场站管理模式下车辆并网前可调度的潜在动态资源(包括可用车辆数量、电池容量、剩余电量等)。通常,电动汽车通过 BMS、ISO 15118 协议将电池实时数据安全地上传至平台,通过身份认证来确保数据的可靠性和安全性。

V2G 平台具有分布式架构和云端协同能力,融合充电桩、导航、调度等多源数据,实时感知设备和能源状态,开展充放电调度策略的智能优化。V2G 平台普遍采用加密传输、分级访问权限管理、异地容灾等手段,防范数据泄露和篡改,应对大规模设备接入带来的数据安全风险。适用于能源互联网中“车-桩-网”场景的多方安全计算框架^[17],可在保障数据隐私前提下进行多主体之间的高效协同优化与智能调度。V2G 平台还对充电交易、电能质量、用户隐私等提供综合保护,遵循 NB/T 11305.1—2023 等行业规范和标准。

(三) 车网互动示范应用

已有多个城市实施了 V2G 示范项目,相应的技术路径与应用模式具有多样性,在不同层面验证并丰富了 V2G 柔性负荷管控场景。虚拟电厂与有序充电结合的技术路线成为主流方向,通过聚合电动汽

车充放电资源参与电网调峰和调频,有效提升了电力系统的灵活性与稳定性^[18]。各地利用域内能源结构、用户特点、产业基础形成了多样化的应用场景。例如,广州市、深圳市重点推进商业园区与公共充电桩群的规模化应用;杭州市依托分时电价机制引导居民低谷充电,保持充电负荷与电价信号的动态匹配;山东省探索重卡换电站的高功率放电模式,服务工业侧调峰和新能源消纳需求。

在商业化层面,我国 V2G 运营服务体系处于探索与培育阶段。主流的商业模式依然是单一的充电服务收入,尚未形成兼顾电力交易、辅助服务、数据增值的多元化盈利结构^[19]。受限于分时电价机制覆盖不足、双向充放电激励政策不完善,电动汽车用户普遍担忧频繁放电对电池寿命的不利影响,对参与电力市场和调节服务的认知不清晰,实际参与意愿有限。此外,不同用户群体的充放电需求具有差异性,市场细分程度偏低,现有需求响应主要关注电网应急调峰,尚未与新能源消纳、电力辅助服务形成衔接及融合^[20]。

随着政策驱动逐渐转向市场化运作,多元激励机制成为 V2G 示范项目的重要特征。前期以固定补贴为主的政策模式仍在市场培育阶段发挥关键作用,同步发展包括现货电价、积分兑换、收益共享在内的多样化收益机制。例如,深圳市提供虚拟电厂补贴,激励网约车群体参与 V2G,部分兆瓦级超充站的单日放电量超过 1.3×10^4 kW·h;山东省依托 V2G 电力现货交易机制,开展重卡换电站按 15 分钟级实时电价调度,有效降低企业用电成本;上海市在社区私人桩应用中引入放电积分兑换充电优惠机制,显著提升用户参与的积极性。

在标杆应用场景方面,各地正在建设示范项目与工程样板,积极探索可复制推广的 V2G 模式(见表 2)。例如,广州市黄埔中央绿地城南 V2G 旗舰店作为“电鸿+大功率 V2G+光储超充+10 kV 直降充电+自动充电+共享充电+换电+多元服务”的综合性示范站,建有 3 台大功率 V2G 充电堆(功率为 600 kW,含双枪终端 4 个、液冷单枪终端 2 个),形成“源网荷储服”一体化运营体系,实现光伏直供、储能调峰、灵活调节的协同运行。此外,面向居民终端的分布式 V2G 场景也在逐步探索中。具备高速电力线载波通信、第四代移动通信模块的 V2G 充电桩,可直接连接台区边缘终端与后台平台,实

表2 城市V2G示范项目概况

城市	示范重点	项目特点	引用来源
上海	社区私人桩规模化V2G项目，重卡换电站V2G组网，全链路集中测试与标准制定	计划投建1500台7kW V2G直流桩，聚合10MW柔性负荷；接入500台新能源重卡，年放电 2.6×10^5 kW·h；形成智能充电桩地标	[21]
广州	电力“充储放”一张网，“电力+汽车”双链协同	推出6款V2G车型，销量超3万辆；各方共建V2G城市标杆项目	[22]
深圳	兆瓦级V2G超充站、跨省联动与市场化激励	莲花山超充站单日放电 1.3×10^5 kW·h，峰值功率为1052 kW；放电服务收益为4元/(kW·h)，网约车参与度高	[23]
合肥	政务中心“光储充+V2G”一体化、城市级V2G商业模式	集成光伏、储能、V2G与统一调度平台；发布专项奖补机制激励车主与聚合商	[24]
常州	分散式V2G试点	探索分布式充电桩与电网协同调度	[25]

现交流侧双向能量流动与智能充放电控制。此类设备兼容多种家庭及社区使用环境，具有成本低、易推广、可聚合等特点，成为构建广泛分布、分层协同的V2G“毛细血管”网络的关键元素。

整体上，我国V2G示范项目在规模化应用、技术验证、商业模式创新等方面均取得良好进展。随着设备成本的稳步走低，V2G充电桩价格下降至普通充电桩的1.2~1.5倍，经济可行性进一步提高。深圳市、广州市、山东省在V2G工程示范方面走在前列，为实现2025年电动汽车充电量60%集中于低谷时段、2030年新型电力系统灵活调节能力显著提升等发展目标提供了实践支撑与技术依据。

(四) 国际进展与经验借鉴

欧洲、美国、日本等主要经济体采取政策、市场、技术协同的方式推动形成了各具特色的V2G发展路径，相关实践为我国V2G规模化应用提供了政策标准、市场机制、技术商业化等方面的借鉴。国际经验表明，构建稳定、透明、激励相容的政策与市场环境，是引导技术投资、激发多元主体参与、保障V2G生态长期发展的重要前提。

立法保障、标准先行是国际普遍经验。美国在《基础设施投资与就业法案》中明确了V2G发展目标，加利福尼亚州公共事业委员会2022年批准了电动汽车分表计量规范，许可单独计量充放电电量以降低用户参与门槛^[26]。英国能源监管机构支持Octopus Energy等清洁能源公司推出动态电价方案，鼓励用户在高峰时段向电网放电并获取收益^[27]。在通信协议与互联互通方面，国际电工委员会的61851系列标准、欧洲开放充电协议、日本CHAdeMO协

会制定的双向充放电标准为“车-桩-网”协同提供了底层基础^[28]。

在市场机制设计方面，成熟电力市场为V2G价值实现提供了多元化渠道。美国将分布式储能（含电动汽车聚合资源）纳入电力批发市场与需求响应项目，用户可通过聚合商参与电力市场交易来获取放电收益^[29]。美国加利福尼亚州太平洋燃气与电力公司实施放电补偿价格机制，在边际容量成本中计入放电价值，激励明确且操作简便。英国计划近期推行全市场半小时结算机制，支持电动汽车以调峰、调频等形式参与，促进充放电行为的精细化定价^[30]。

在商业模式探索方面，代表性的示范项目从单一峰谷套利拓展至辅助服务、园区微网等高价值场景。英国Sciurus项目通过智慧能源平台聚合家用V2G资源，优化充放电计划并参与平衡市场。日本丰田公司联合中部电力公司、美国Nuvve公司，在工业园区内构建了“虚拟电厂+V2G”系统，实现本地功率平衡与可再生能源最大化消纳的目标，提升了电网灵活性与稳定性。

在技术应用与经济性验证方面，国际上已有较成熟的技术体系，形成了可参照的实证案例。双向充放电、聚合调控、实时通信等关键技术的标准化与工程化水平较高。欧盟e-mobility Works项目全面研究了双向充放电对电池寿命的影响，推动形成跨品牌、跨平台的统一通信协议^[31]。美国以充电站为聚合节点，将电动汽车集群作为虚拟电厂参与调频和现货交易^[32]。德国、荷兰建设了智能充电网络，以实时信息交互方式优化充电调度，提升了用户体验与电网互动效率^[33]。北欧、北美、韩国、丹麦等

开展了区域级的V2G经济性研究,证实了电网辅助服务具有良好潜力^[34,35]。

三、车网互动关键技术研究进展

受数字电网的发展推动,V2G应用场景更为丰富,逐步从示范试点转向多区域、多主体参与的综合能源系统。从硬件设备、资源管理调控两方面厘清V2G关键技术研究进展,有助于推动V2G向规模化、常态化运行的演进,攻克硬件设备性能、灵活资源聚合、多主体协调等环节面临的技术瓶颈与工程挑战。

(一) 硬件设备

1. 双向充电桩

双向充电桩是支持电动汽车与电网双向能量交互的核心接口,事关V2G系统的能量转换效率、运行安全性、电能质量^[36]。面向V2G场景,双向充电桩需兼具高效的双向功率转换能力、高功率密度运行水平、与配电网的电磁兼容性^[37]。当前研究关注功率转换效率提升、高精度且柔性的能量流控制。

在功率器件与拓扑方面,广泛采用基于SiC、GaN材料的宽禁带半导体功率器件,利用高开关频率、低导通电阻等特性来显著降低开关损耗^[38,39]。基于SiC器件的三电平拓扑双向充电桩,整机转换效率超过98%^[40]。在变换器结构与滤波环节,为了兼顾高功率密度与电能质量需求,相关研究集中在双向交流/直流变换器拓扑选择与控制策略优化^[41],LCL型滤波器、谐振变换器等结构的参数设计与抑制谐波的改进方法^[42,43]。

在系统架构与运行安全方面,故障监测与保护是确保双向充电桩长期可靠运行的关键功能。集成电压、电流等传感器,引入基于深度学习的故障诊断算法,对内部绝缘劣化、元器件开路/短路等异常状态进行实时检测与定位,能够提升充电桩系统的故障自诊断能力与运行安全性^[44,45]。

整体上,双向充电桩的高效拓扑结构设计、宽禁带器件应用、智能化故障监测等进展显著,但多场景适应性、长期可靠性评估、成本约束条件下的工程化应用水平仍待提升。

2. 动力电池充放电安全管理

动力电池是电动汽车参与V2G的能量载体、主

要的灵活性来源。需要在适配电网调度需求的基础上最大限度地保障电池的安全性与使用寿命,而精准的电池状态感知是实施安全且高效调度的前提。当前研究中,扩展卡尔曼滤波、粒子滤波等模型驱动方法,基于长短期记忆网络的数据驱动方法趋向融合应用,提升了SOC与健康状态的在线估计精度,为V2G场景下的充放电策略优化提供了可靠的数据支撑^[46,47]。针对V2G频繁充放电可能加速电池老化的问题,提出了多种充放电深度约束策略,如将放电截止SOC限定在20%以上、通过分层BMS将相关约束嵌入上层调度模型等,以硬约束形式落实至具体的充放电动作,有效延缓容量衰减并延长电池循环寿命^[48,49]。在快充工况下,联合运用液冷热管理系统、柔性充电曲线优化技术,可将充电时间压缩至约15 min并有效控制电池的内部应力与温升水平,平衡充电效率、热安全、耐久性要求^[50,51]。

在低温、高倍率充放电的复杂工况下,现有的电池状态估计与寿命预测模型在精度及鲁棒性方面存在不足,难以充分覆盖V2G运行的多样化工况;快充/快放行为对电池长期寿命与残值的影响机理有待更多的实车运行、长期试验的验证及校准^[52,53]。在电网灵活性需求、电池寿命保护之间取得更精细的权衡,是后续V2G技术演进的待解决问题之一^[54,55]。

3. 信息通信与隐私保护

“车-桩-网”高效协同需以低时延、高可靠、安全可信的信息通信网络为基础支撑。发展基于第五代移动通信(5G)Uu接口、蜂窝车联网(C-V2X)PC5接口的融合通信架构,利用C-V2X支持“车-桩-路”各单元之间的直连通信(时延<20 ms)并由5G网络承担广域回传功能,再结合边缘计算将关键决策算法下沉至充电站侧,由此将端到端通信时延控制在50 ms以内,满足V2G实时调度的响应要求^[56,57]。基于IEEE 1588精密时间协议进行桩群与调度中心的时钟同步(微秒级时间同步精度),显著提升分布式优化与协同控制的时序一致性及稳定性,保障分布式控制任务的协同性及一致性^[58,59]。

在数据安全和隐私保护方面,同态加密、差分隐私等密码学与统计隐私技术逐步引入以“车-桩-网-云”为基础的协同优化框架。同态加密允许在密文状态下直接对充放电数据进行聚合计算,避免明文数据集中存储及传输可能产生的泄露风险。差

分隐私向统计结果注入可控噪声，在维持优化性能的前提下有效保护个体用户的行为隐私^[60,61]。然而，5G网络、C-V2X终端在部分区域的覆盖范围及渗透率仍待提升，全同态加密等高强度隐私保护技术在计算复杂度与时延方面开销较大，开展大规模工程应用仍依赖专用加速硬件与优化算法方面的进一步突破^[62]。

(二) 资源管理调控

1. 电动汽车灵活性资源聚合与建模

V2G系统的充放电调度是实现上述硬件与通信技术价值的运行载体。V2G电能调度可分为单向参与、双向参与类型：前者聚焦电动汽车充电行为的优化控制，主要通过错峰充电对电网负荷曲线“填谷”；后者同时考虑充电与放电，通过在峰时段对反向出力“削峰”以在更大程度上发挥电动汽车的灵活性调节潜力^[63]。考虑电动汽车的移动性及其电能需求的时变特性，相关调度问题通常按照约束优化问题进行建模，多采用线性规划、二次规划、动态规划、粒子群优化等方法进行求解^[64]。

在聚合层面，分散分布的电动汽车可调充放电能力需要经由聚合技术整合为虚拟电厂等形式，再以规模化主体身份参与电网调度与电力市场。聚合模式包括集中式、分布式两类。在集中式聚合模式下，聚合商统一采集车辆SOC、可调度时间窗口、电价偏好等信息，再集中决策并统一下发充放电指令，具有响应迅速的优点，也便于满足电网调频、备用容量等辅助服务要求，在部分示范项目中获得应用^[65]。相比之下，分布式聚合模式更适用大规模、多主体参与的复杂场景，常采用多智能体深度强化学习框架，将每辆电动汽车或其群组视为自主智能体，在考虑交通拥堵、动态电价等因素的情况下通过博弈与协同学习完成分布式自主优化，仿真结果表明可较传统模型预测控制方法提升调度精度约20%^[66,67]。

也要注意，多智能体分布式学习算法在大规模场景下仍面临训练收敛性不足、通信开销较大等问题，算法的稳定性与可解释性也有提升空间。资源聚合过程中在保证调度性能的前提下合理控制数据采集粒度，避免聚合商过多获取用户个体信息，构建兼顾效率与隐私保护的聚合机制，仍是相关技术大规模推广前待解决的问题^[68]。

2. “车-桩/站场”一体化运行调度优化

车辆与充电设施的高效匹配是影响用户响应积极性、系统整体运行效率的关键环节。针对充电引导与排队问题，可将排队论模型与图优化算法相结合，利用实时交通信息、站场负荷状态、动态电价信号，为电动汽车提供最优充电站选择与出行时间建议，能够最小化用户的综合时间（由行驶时间、等待时间、充电时间构成）成本，仿真结果表明用户平均总耗时降低20%~30%^[69,70]。

在多运营商并存的市场环境下，合理的定价与激励机制是协调各方利益、引导V2G资源优化配置的核心措施，基于均衡博弈或非合作博弈的定价模型得到较多应用。在此类模型中，运营商作为领导者设定服务价格，用户作为跟随者根据价格策略与服务选择充电站。引入自适应分段线性化等手段，将复杂的非凸优化问题转化为混合整数线性规划问题并进行求解，实现运营商竞争格局下用户空间分布与设施利用率的综合优化^[71]。在“双碳”目标驱动下，碳交易、绿色电力证书等绿色激励工具被引入定价框架，以引导电动汽车优先在新能源大发时段充电或者向电网放电，提升电网的低碳高效运行^[72]。将强化学习等数据驱动方法嵌入动态激励策略设计，在线学习用户行为模式，实时调整价格与激励水平，在部分试点中达到了提升辅助服务的参与率和响应速度的目的^[73]。然而，这类机制的应用成效依赖对用户偏好与出行规律的精确建模（而现实中用户行为具有不确定性与有限理性），给实际部署带来挑战^[74,75]。

V2G电能调度本质上是有限电能或调节容量在多用户之间的分配问题，因而公平性成为调度策略设计的重要考量。在充电阶段，需在满足系统约束的前提下尽可能公平地分配可用电能；在放电阶段，需合理分摊放电任务，避免车辆长期承担过多的调节责任^[76]。通过不同的公平性度量构建了多种公平调度模型：基于最大-最小公平原则，在家庭用户场景中优先保障电动汽车的基本用能需求，再按公平性目标分配剩余电能；在目标函数中引入对电动汽车未满足电能需求的惩罚项，平衡经济性与公平性等目标^[77]。

“车-桩/站场”层面的调度优化在运行性能与经济性、调压与调频等方面进展良好，但仍以系统视角为主，而对单个用户的行为决策机理、电动

汽车与充放电设施之间的细粒度时空耦合关系等刻画不足。受行业数据获取存在壁垒、跨主体数据共享机制缺失等因素的制约，电动汽车用户服务偏好、出行模式及其业务响应的动态演化等不易获得，V2G资源可调度性能提升的作用机理不够清晰，依托大规模真实数据的系统量化分析有待展开。此外，充放电设施在区域分布、容量配置方面的差异性易诱发新的“车-桩”资源不平衡现象，对V2G响应资源的可靠性、调控策略的鲁棒性等均提出更高的要求。

3. “桩/站场-配电网”协同控制与联合调度

在高渗透率电动汽车接入配电网的环境下，大量无序充电易引发节点电压越限、变压器过载、潮流分布失衡等问题，因而充换电站与配电网的协同运行优化成为保障系统安全、提升资源利用效率的关键技术方向。从参与电力市场的视角看，电动汽车集群作为可聚合的分布式储能，具有提供调频、备用容量等辅助服务的潜力。虚拟电厂是实现V2G中“桩/场-网”协同的重要手段。发布实时电价信号、下达直接负荷控制指令，可引导用户将充电行为转移至低负荷时段或者在高峰时段向电网回馈电能，能够有效降低区域电网峰值负荷、提升系统经济性与运行柔性^[78,79]。现有的市场参与模式主要分为直接接入（集群直接由电网调度）、间接接入（通过聚合商参与）两类，相应的交易决策依赖数学规划、经济调度等分析工具，持续优化系统运行成本与新能源消纳水平^[80,81]。

目前普遍采用交替方向乘子法（ADMM）及其变体来解决配电网调度机构与充电站运营商的协调优化问题^[82]。ADMM具有天然的分布式结构、较好的隐私保护特性，可将全局优化任务分解为各参与主体独立求解的子问题，再通过迭代更新实现接近集中优化效果的分布式协调^[83]。ADMM无需交换敏感的原始数据，在多类V2G场景中验证了抑制配电网电压波动、削减峰值负荷的有效性^[84]。面向V2G多主体强耦合的复杂场景，在ADMM算法中引入预测步与动态步长调整，可提升“充电站-共享储能-配电网”联合优化问题的收敛速度与计算效率，支撑未来大规模、多主体V2G协同调控^[85]。也要注意，ADMM类算法的收敛性能对惩罚因子等参数较为敏感，通常需要针对特定问题进行调优；虚拟电厂等用户的长期参与度与可持续性，也

高度依赖合理的激励设计与政策支持^[86]。

4. 场站选址与容量规划优化

充电场站布局是支撑V2G规模化发展的关键基础设施，需要在交通便利性、电网承载能力之间进行协同权衡。较多构建耦合交通出行需求与配电网节点容量约束的多目标选址-定容优化模型，同时优化固定充电站的空间布局与容量配置，以兼顾用户充电可达性与系统运行安全性。采用固定充电站与移动充电设施协同部署的方案，能够以较低的投资成本提升区域服务覆盖率，减少充电盲区，增强系统韧性；应用容量分级配置策略并依据负荷预测结果匹配不同功率等级设备，可提高整体资源利用效率^[87]。

从决策属性看，场站布局优化属于综合考虑“储荷”资源配置的中长期规划问题，在较大程度上依赖交通流演化和负荷增长的长期预测。受预测误差、外部环境变化的影响，传统模型在应对不确定性方面仍存在局限性。后续，可引入更高精度的需求预测方法，结合采用鲁棒优化、分布式优化等技术，提升场站规划方案在多情景下的适用性与稳定性^[88,89]。

5. 绿色园区与分布式能源系统协同运行

充放电/换电场站由单一的电能补给点逐步演进为与新型电力系统深度融合的分布式能源节点。在场站侧集成光伏、风电等分布式电源，建设“光-储-充-放”一体化场站并与共享储能设施协同运行，形成绿色智能微电网或区域能源枢纽，可在V2G中承担更广泛的能量管理与碳排放优化功能，促成高效的电力自平衡与本地消纳^[90]。针对新能源出力的波动与不确定性，发展耦合电动汽车集群的园区“源-储-荷”联合调度模型，引入基于李雅普诺夫稳定性理论的在线优化方法，可在保障系统稳定运行的前提下改善运行经济性^[91]。零碳场站引入碳交易、绿色电力等市场机制后，有望进一步提升新能源消纳比例并降低园区整体碳排放^[92]。

在高比例新能源接入、多主体协同参与背景下，场站作为微电网单元并网运行，其稳定性分析、层级化控制与保护策略仍有较大提升空间。面向V2G和多能协同的技术标准、接入规范、评价体系等未能统一，在一定程度上制约了绿色零碳园区场景的推广应用。

（三）关键技术布局与创新趋势

国内外在双向充电、电池管理、聚合调度等方向已有较为密集的专利布局。2018年以来，相关专利的年申请量持续攀升，我国成为电动汽车与电网产业技术领域的最大专利来源国；技术主题分布集中在双向功率变换拓扑、电池健康状态在线评估与寿命预测算法、V2G通信安全协议、虚拟电厂聚合调度方法等方面。

V2G技术创新呈现主体多元化格局，各细分领域中出现了行业领军者。在车端BMS、整车能量管理集成方面，以比亚迪股份有限公司、特斯拉公司为代表的车企布局集中^[93]。在电网侧互动协议与调度平台方面，国家电网有限公司、中国南方电网有限责任公司等企业处于领先地位^[94,95]。在高可靠、高效率双向充电模块方面，特来电新能源股份有限公司、万帮星星充电科技有限公司等设备供应商积累深厚^[96,97]。在人工智能（AI）调度算法与数据安全方面，华为技术有限公司、谷歌公司等科技企业成为主要的布局者^[98]。

当前的V2G技术布局具有两大特点：从单一设备创新转向“车-桩-网-云”系统级解决方案集成，电力电子与AI、物联网与区块链等跨领域技术融合加速。然而，在跨运营商数据互操作标准、V2G参与碳交易的核证方法等涉及多方协同与制度创新的交叉地带，专利分布相对稀疏，既是当前规模化应用的瓶颈环节，也预示着未来的创新方向与价值空间。

四、车网互动规模化应用挑战

（一）车端电池寿命与安全约束

在车端，动力电池的不确定性仍是制约V2G常态化应用的核心因素。频繁的充放电对电池寿命与安全性的影响机理未能完全厘清，V2G工况下通用的电池健康状态评估模型与寿命损耗计量方法不够完善，车企与用户普遍认可的损耗-补偿量化标准尚未建立。现有示范项目多采用经验性折算系数或者依赖补贴政策，难以真实反映不同车型、不同使用场景下的电池价值消耗，车主对参与V2G的长期经济性、电池残值影响等缺乏明确预期。

在多车型、多电池体系、多运行工况的大规模接入场景下，热失控预防、故障诊断与隔离、安全

认证与多级保护等方面的统一技术标准及协同防护体系不够健全。车端的动力电池管理系统与V2G平台之间在数据采集粒度、告警阈值、控制策略方面未有统一规范，而不同厂商的安全冗余设计与责任划分边界模糊，发生异常后的责任界定与风险分担难度较大。电池寿命与安全风险存在不确定性，再叠加收益机制不透明、不稳定，导致车端主体更倾向于保守参与，成为制约V2G从示范走向常态化运营的重要障碍。

（二）桩端互联互通与性能短板

在“桩-平台”侧，互联互通不足与V2G性能能力受限的问题较为突出。尽管在政策与标准的推动下，充电接口、通信协议等逐步迈向统一，为资源统筹确立了基础条件；但在实际运营层面，不同充电运营商在充电接口协议、通信标准、数据格式、认证机制方面仍有明显差异。国家标准、行业标准、企业标准长期并存，导致单一用户在不同站场充电时需切换不同的充电应用平台、重复注册并维护多套支付体系，在客观上割裂了不同平台的V2G资源池。平台之间缺乏稳定且高效的数据共享和结算机制，跨运营商的负荷聚合与统一调度成本较高，难以形成面向区域乃至更大范围的协调控制能力。

具有双向充放电能力的V2G充电设施整体占比偏低，存量充电桩在硬件接口、功率模块、测控单元、通信能力等方面普遍难以满足双向互动需求。V2G设备的可调功率范围、动态响应速度、控制精度等关键性能指标明显不适应高比例新能源接入条件下对快速调节、高频互动、高可靠性的要求。在频率调节、备用服务等辅助服务场景中部分充放电桩设备的实时响应能力、持续输出能力、极端工况下的稳定性均未经过大规模实践验证。

从商业模式看，多数充放电运营仍以单一电量计费为主，尚未形成差异化的充放电服务产品，也缺乏基于容量、备用、调节性能等的收益分配机制。“桩-平台”侧缺乏与设备性能升级、服务能力提升挂钩的市场化收益通道，导致运营商在V2G设备改造及更新方面动力不足，进一步放大了互联互通与性能不足对V2G规模化应用的制约效应。

（三）网端数据支撑与市场机制薄弱

网端与系统层面的挑战集中在数据协同、控制架构、市场机制三方面。目前，数据与控制体系仍难以有效支撑超大规模电动汽车集群的灵活接入与精细调控。“车-桩-网”系统涉及车辆运行、电池状态、配电网运行、价格信号、环境参数等多源异构数据，现有的V2G平台在时空尺度下的实时感知、负荷预测、协同优化能力均有不足。针对不同区域、运营商、电网层级的分布式控制架构尚不成熟，调度指令下发和响应反馈依然存在链路延迟、执行偏差、信息丢失等问题，V2G在“削峰填谷”、平抑波动、应急支撑方面的潜能难以充分发挥。

数据安全和隐私保护技术以及相应的制度体系尚不健全。V2G平台承载涉及用户隐私、电网运行工况、车辆位置与出行行为的大量数据，而数据加密、跨域传输访问控制、多方安全计算等技术在大规模、多主体协同场景下的工程化应用仍不充分，兼顾数据安全合规、隐私保护、价值挖掘的制度与技术组合方案处于缺失状态。不同主体在数据权属、使用边界、收益分配等方面缺乏统一认知与清晰机制，既抑制了数据开放共享的积极性，也影响了数据驱动V2G调度与优化水平提升的实践。

现行市场机制中V2G的制度化嵌入程度不高，导致长期激励不足。电动汽车参与需求响应、辅助服务市场的规则体系仍不完善，如需求响应集中于电网紧急缺口与保供安全场景，尚未充分体现新能源高比例接入背景下对灵活性资源的常态化利用需求。需求响应触发条件单一、响应频次低，服务品种不够丰富，充放电容量、调节速度、响应可靠性的价值体现不足。V2G参与辅助服务的结算机制与收益分配模式不稳定，车企、运营商、电网企业等主体在责任分担与收益共享方面的机制安排不清晰，未能形成各方持续参与V2G的稳定预期与商业闭环。

五、车网互动规模化发展路径与关键技术方向

V2G规模化发展的必要性与紧迫性源于构建新型电力系统的内在需求。以广东省为例，电网方面的研究表明，2030年前后电力系统将面临约

8×10^6 kW的峰值调节缺口，若完全依靠新建煤电、气电等常规电源填补缺口，则中长期需新增装机容量 $1 \times 10^7 \sim 2.3 \times 10^7$ kW，投资规模较大；通过虚拟电厂等机制聚合电动汽车等分布式资源提供调节服务，可节约等效电源侧投资320亿~1465亿元，经济性优势凸显。此外，2030年前后全省V2G资源的放电响应能力预计为 2.8×10^7 kW，约占全省最高负荷的10%，表明V2G具有作为系统级战略调节资源的潜力。在环境效益方面，V2G将有效提升电网对波动性可再生能源的消纳能力。以 2.8×10^7 kW的调节潜力测算，若用于平抑新能源出力波动，则每年可助力电网增加消纳清洁电量数十亿千瓦时，相应减少碳排放数百万吨，成为推进“双碳”目标的重要支撑。在社会效益层面，V2G产业链条长，涉及电动汽车制造、充电设施建设、平台运营、数据服务等，实施规模化发展不仅能带动上游设备制造业的技术升级，而且可催生虚拟电厂运营商、负荷聚合商、能源数据服务商等新业态。更重要的是，V2G创造的经济价值可直接传导至终端用户，通过放电补贴、积分奖励等模式惠及广大电动汽车用户，提升公众参与能源转型的获得感，加快形成绿色低碳的社会共识。当前，V2G由单点示范走向规模化应用仍面临基础设施、标准体系、收益保障、数据安全等维度的约束，亟需面向国家战略目标、发挥地方资源禀赋，形成可落地的V2G实施路线。同时，有必要划分发展阶段并明确各阶段的建设重点、关键任务、技术攻关方向，构建可复制、可推广的V2G规模化发展路径。

（一）分阶段发展路径

主要按照起步阶段、完善阶段、远景阶段的划分，提出V2G分阶段发展路径。2026年，初步构建V2G关键基础设施和基础制度，开展典型应用场景的技术应用示范。2027年前后将进入以规模化示范、市场化运营为特征的完善阶段。2030年前后，在电力体制改革深化、交通-能源融合、“AI+”能源高质量发展战略的驱动下，V2G有望迈入与电力市场、碳市场、交通系统深度耦合的远景阶段。需要指出的是，不同地区的V2G应用场景及其功能侧重点存在较大的技术路径差异性：在大中城市和负荷中心地区，V2G侧重提升电力系统保供能力和局部运行安全；在高比例新能源基地和“源网荷储”

一体化示范区，V2G突出服务就地消纳、提高新能源利用率的功能。相关差异化需求将对各区域的V2G发展路径与技术方向选择产生重要影响。

1. 起步阶段

在该阶段，V2G的发展重点是“打基础、立规则、做示范”。依托现有的充电基础设施，加快建设具有V2G功能的充放电设施和V2G接入管理平台，形成可支撑大规模V2G的物理基础和数字底座。在现行的辅助服务市场、虚拟电厂等框架下，为电动汽车参与电力服务提供制度入口。通过峰谷分时电价、容量补偿、公共补贴等手段，初步形成V2G多方主体收益分配机制。考虑产业链成熟度、用户接受度等约束因素，本阶段V2G仍以小规模示范工程和区域试点为主，为后续大规模推广积累技术和管理经验。

2. 完善阶段

在该阶段，V2G的发展重点是“提规模、强市场、优机制”。随着具有双向充放电能力的车辆保有量增加以及标准化充电接口、通信协议的趋于统一，V2G将从零散示范走向成片区、跨区域的聚合运营。加快建设标准化、大规模、高功率的复合充换电站和聚合控制平台，提升资源聚合与快速响应能力。面向电力现货市场、辅助服务市场，完善适配V2G的多元交易品种和结算机制，形成以价格信号为核心的灵活性资源价值体现方式。协同运用市场机制和金融政策，逐步构建与V2G适配的绿色贷款、绿色债券等投融资工具，引导社会资本参与V2G基础设施和运营平台建设，推动商业模式从补贴驱动向市场驱动的平稳过渡。

3. 远景阶段

在该阶段，V2G的发展重点是“深耦合、强协同、重价值”。到2030年，我国风光发电的总装机容量将超过 1.2×10^9 kW，电力系统对灵活“储荷”资源的需求显著提升，V2G将从局部调节资源演进为电力系统重要的可调度电源与储能资源。V2G与电力现货市场、多时间尺度辅助服务市场以及碳排放权、绿色电力证书等碳金融工具深度融合，形成“电-碳-V2G”一体化市场响应体系，推进多维价值协同开发。依托信息通信、“车-能-路-云”协同优化等技术，实施V2G在区域电网、配电网等层级上的协调控制：在城市负荷中心，采用柔性充放/换电策略与交通引导方式，缓解局部网架瓶颈

并提升供电可靠性；在高比例新能源地区，与风光出力预测、网源协同控制联动，构建“基地侧就地消纳+通道侧灵活调节”的一体化运行新格局。届时，V2G将在交通强国、新型能源体系建设中发挥重要的支撑作用。

（二）关键技术发展方向

在“AI+”、交通-能源融合发展的背景下，V2G关键技术呈现由单一设备控制向跨系统协同、由经验调度向智能优化、由局部试点向区域协同的演进趋势。

1. AI驱动的资源优化利用技术

面向全省乃至跨省域的大规模、高动态电动汽车集群，实现相关灵活性资源的高效利用，需要发展以AI为核心、数据驱动的智能管控技术，构建“精准感知-协同决策-闭环优化”的技术体系。在可调节负荷分析与预测层面，传统的统计方法难以刻画气候、节假日、实时电价、用户行为等因素耦合的复杂影响，需突破多源异构数据融合场景下的高精度预测技术。未来研究可聚焦数据驱动、融入深度学习方法的混合预测框架。在保障各运营主体数据隐私的前提下，建模负荷的时空演化规律，利用联邦学习架构聚合分散的充电行为数据，共同训练预测模型，以将区域级短期负荷预测的均方根误差稳定控制在5%以内，为调度决策提供可靠输入。

对于超大规模集群的协同调度，集中式优化面临计算复杂度高、通信压力大、隐私泄露等风险，基于多智能体深度强化学习与分布式优化算法的智能调度技术是可行的突破方向。具体地，将电动汽车、充电站视为智能体，构建集中式训练、分布式执行的多智能体深度强化学习框架；中央控制器利用全局信息训练批评家网络，用于评估系统状态；各智能体配备执行器网络，根据本地观测信息作出充放电决策；应用多智能体深度确定性策略梯度等算法进行协同训练，使智能体能在仅掌握局部信息的情况下学习出接近全局最优的协同策略。此类方法在处理数亿量级车辆调度时可在秒级时间内生成调度指令，将集群整体功率与目标值的偏差维持在3%以内，同步满足用户充电需求约束。

联邦学习与区块链结合也为跨主体协同调度优化提供了新的可信范式。构建基于区块链的联邦学习平台，将调度模型训练过程中的模型更新、贡献

评估、激励结算等环节记录在链，确保过程可追溯、贡献可计量、收益可分配，为破解跨主体数据协同与价值分配难题提供技术支撑。

2. 交通-能源融合系统协同优化运行技术

现阶段，交通系统、能源系统多为独立运行，“车-路-桩-网”资源难以全局协同，制约了V2G潜能的释放。在交通-能源融合的趋势下，加快突破“交通网-能源网-信息网”跨系统协同建模与动态耦合技术，构建覆盖“车-路-桩-网-云”的多维数字孪生与智能决策-控制体系，实现电动汽车移动储能资源在交通-能源系统下角色任务互换与行为服务的精准感知及可视化。发展电网状态联合感知的充电引导策略是关键技术方向。例如，在高速公路“移动能源走廊”、城市无人驾驶交通补能枢纽等场景下，协同控制分布式风光发电、集中式储能和V2G，引导车辆在低负荷、低拥堵路段和时段进行错峰补能以缓解局部网架与路网拥塞，同步提升沿线绿电就地消纳水平和充放电设施利用率。与地图导航、V2G运营平台、虚拟电厂平台等开展数据共享与价格信号联动，可形成“看得见、算得清、调得动”的交通-能源协同运行新机制。

六、车网互动规模化发展建议

（一）构建智能互联和统一标准的基础设施体系

基础设施是V2G规模化发展的物理基础，建议在国家和地方层面强化跨部门协同，在土地空间保障、配电网扩容改造、财政专项资金、绿色金融等方面给予配套政策支持。加速推进充电接口、通信协议、计量结算、数据接口等关键国家标准的修订、统一和强制实施，积极推动国内标准与国际标准的对接互认。优先针对双向充放电设备、负荷聚合平台制定可操作的技术规范与检测认证体系，降低互联互通成本。在基础设施布局方面，推行电网承载力评估、交通出行热力图双约束规划方法，优先在城市群、交通枢纽、高速公路服务区、大型园区等关键节点规划建设具有V2G功能的智能充换电设施网络，探索“光储充放氢”一体化模式，建设多能互补、高效协同的智慧能源站。全面推广“5G+北斗+物联网”智能终端，构建全国统一、区域互联的“车-桩-云”一体化监控管理平台，提

升设施状态感知、远程控制能力，具备电、氢多能流协调优化能力，为V2G资源的广域聚合与高效利用筑牢数字底座。

（二）聚焦关键技术攻关与示范应用

建议在国家级科技计划项目、能源领域科技创新规划中支持V2G与交通能源融合专项，集中优势力量攻关大功率高可靠双向充放电模块、车规级电池全生命周期健康状态精准评估及预测、超大规模异构车桩集群的分布式协同优化调度、“交通-能源-信息”网络的数字孪生与仿真推演等方面的核心技术。鼓励龙头企业、电网公司、科研院所共建车网互动国家技术创新中心和联合实验室，发展涵盖部件测试、系统联调、场景验证的V2G全链条试验认证平台。在全国范围内遴选一批有基础的城市、园区、高速公路走廊，率先部署“车-能-路-云”一体化综合示范工程，形成覆盖不同场景、可量化评估、可复制推广的V2G技术解决方案和商业模式案例库。

（三）强化数据安全治理与系统韧性保障

建议将数据安全、系统韧性提升至保障V2G发展的高度，由网信、能源、工信等管理部门联合牵头，加快制定关于V2G数据安全的管理规定，明确数据分类分级、加密传输、去标识化处理、访问控制、跨境流动等方面的具体要求。释放系统协同潜能应以融合利用“车-桩-网-云”海量数据为基础，也需以安全可控为前提，加快构建覆盖数据采集、传输、存储、使用、销毁全生命周期的安全标准与隐私保护规范体系，明确数据权属、分级分类标准、匿名化脱敏规则、跨主体共享边界。依托省级能源大数据中心，与国家工业互联网大数据资源体系联动，建设地市级V2G安全监测预警与应急指挥平台，支持开展对关键基础设施、核心控制指令、市场交易行为的实时监测、异常感知、协同处置。依托国家-区域能源数据基础设施，建设V2G数据共享与治理平台，采用“数据可用不可见”、联邦学习等技术范式，在严格保障车企、运营商数据资产与用户隐私的前提下开展必要数据的可信流通与联合计算，为精准负荷预测、协同优化调度、市场交易清分、系统安全预警提供高质量的数据支撑。推动建立涵盖电动汽车制造企业、电池厂商、

运营商的电池安全风险联防联控机制和电池寿命数据共享模型,明晰故障责任认定与追溯流程,全面提升应对设备故障、外部扰动、网络攻击等极端风险的能力,保障大规模V2G的长期安全稳定运行。

(四) 健全市场规则和商业模式

加快完善电力市场规则,系统性设计V2G资源参与电力现货、调峰、调频、备用等市场的准入、申报、出清、考核、结算机制,明确电动汽车电池容量及电量作为灵活性资源的商品属性、技术准入标准、性能考核办法、动态价格形成机制,推动V2G从补贴驱动向市场驱动的根本性转变。在试点地区探索建立电池损耗补偿基金,引入电池寿命衰减结算因子,建立并网服务导致的电池衰减评估模型,形成基于放电量的市场化补偿工具,回应用户侧电池损耗成本这一核心关切,稳定多方收益预期并实现风险合理分担。将V2G产生的绿色效益与绿色电力证书、碳排放配额、碳普惠积分等环境权益挂钩,提供“电-碳-金融”复合型产品。培育虚拟电厂运营商、负荷聚合商等新业态,支持电动汽车制造企业、充电运营商、电网企业、互联网平台以合资或联盟等形式,为工业园区、商业楼宇、居民社区等提供定制化的“充电服务+能效管理+需求响应”服务。在长江三角洲地区、粤港澳大湾区等条件成熟的区域,率先开展电动汽车聚合商参与跨省区电力现货交易和绿电交易的试点。

(五) 构建跨部门协同的政策合力机制

推动“车-桩-网”从独立规划转向一体化发展,改变当前条块分割的行政管理状况。建议在国家、省级层面建立常态化的跨部门协调与决策机制,明确能源、工信、交通、住建、自然资源等管理部门的职责边界与协同流程。围绕双向充电和大功率充电基础设施的统一规划布局、电网接入“并联审批”、关键技术与数据标准互认互通等环节,制定并推行一体化的工作指南,成立车网互动协同发展协调工作机构,建立常态化的议事与决策机制。结合本地电网结构、交通布局、产业基础,编制“一城一策”实施方案,明确“车-桩-网”在规划、建设、运营、监管等环节的一体化要求与标准体系,形成产业发展的政策合力。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: August 30, 2025; **Revised date:** December 8, 2025

Corresponding author: Chen Yong is a research fellow from the Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include energy strategy and digital energy. E-mail: chenrong@ms.giec.ac.cn

Funding project: National Natural Science Foundation of China (52407152); Chinese Academy of Engineering project “Research on the High-Quality Energy Development Strategy of Guangdong Province in the New Era: Accelerating the Construction of a Safe, Flexible, and Intelligent New Power System” (2024-GD-05), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2023A1515012372); Guangdong Province New Type Power System Technology Innovation Research Project (1688533517621)

参考文献

- [1] 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].中国电机工程学报,2025,45(S1):18-30.
Kong L D, Zhang B, Han X J, et al. Interactive isomorphic meta-model of vehicle-grid with multi-type charging facilities [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(S1): 18-30.
- [2] 2025年上半年全国机动车达4.6亿辆 驾驶人达5.5亿人 [EB/OL]. (2025-08-28)[2026-01-15]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202507/content_7031802.htm.
In the first half of 2025, the number of motor vehicles nationwide reached 460 million, and drivers reached 550 million [EB/OL]. (2025-08-28)[2026-01-15]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202507/content_7031802.htm.
- [3] 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.
- [4] 新能源汽车产业发展规划(2021—2035年) [EB/OL]. (2020-10-20)[2026-01-15]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5560291.htm.
Development plan of new energy automobile industry (2021—2035) [J]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5560291.htm.
- [5] 关于加强新能源汽车与电网融合互动的实施意见 [EB/OL]. (2025-08-28)[2026-01-15]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=20306>.
Implementation opinions on strengthening the integration and interaction of new energy vehicles and power grids [EB/OL]. (2025-08-28)[2026-01-15]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=20306>.
- [6] 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 L L, Zhang J, Liu Y W, 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.
- [7] 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 X L, Liu Y D, Shen F, et al. Vehicle to grid: Review and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3–23.
- [8] 华光辉, 夏俊荣, 廖家齐, 等. 新能源汽车充换电及车网互动 [J]. 现代电力, 2023, 40(5): 779–787.
Hua G H, Xia J R, Liao J Q, et al. New energy vehicle charging and vehicle to grid interaction [J]. Modern Electric Power, 2023, 40(5): 779–787.
- [9] 深圳市新能源汽车推广应用工作方案(2021—2025年) [EB/OL]. (2021-03-31)[2026-01-15]. https://fgw.sz.gov.cn/gkmlpt/content/8/8662/post_8662484.html.
Shenzhen new energy vehicle promotion and application work plan (2021—2025) [EB/OL]. (2021-03-31)[2026-01-15]. https://fgw.sz.gov.cn/gkmlpt/content/8/8662/post_8662484.html.
- [10] 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]. (2025-06-14)[2026-01-15]. https://www.gz.gov.cn/zwgk/fggw/sfbgtwj/content/post_10322829.html.
Three-year action plan for promoting the development of the intelligent connected new energy vehicle industry in Guangzhou [EB/OL]. (2025-06-14)[2026-01-15]. https://www.gz.gov.cn/zwgk/fggw/sfbgtwj/content/post_10322829.html.
- [11] 广东省推进能源高质量发展实施方案 [EB/OL]. (2023-05-22)[2026-01-15]. https://drc.gd.gov.cn/ywtz/content/post_4186277.html.
Guangdong Province implementation plan for promoting high-quality energy development [EB/OL]. (2023-05-22)[2026-01-15] https://drc.gd.gov.cn/ywtz/content/post_4186277.html.
- [12] 广东省交通运输厅. 2025年春运工作总结情况通报 [EB/OL]. (2025-01-26)[2026-01-15]. https://td.gd.gov.cn/ztl/2025cyzt/cydt/content/post_4661357.html.
Guangdong Provincial Department of Transportation. Report on work summary of 2025 spring festival travel season [EB/OL]. (2025-01-26)[2026-01-15]. https://td.gd.gov.cn/ztl/2025cyzt/cydt/content/post_4661357.html.
- [13] 广东省能源局关于印发2025年电动汽车充电基础设施建设任务的通知 [EB/OL]. (2025-04-01)[2026-01-15]. https://drc.gd.gov.cn/gdsnyj/gkmlpt/content/4/4690/post_4690638.html#4247.
Notice of the Guangdong Provincial Energy Bureau on issuing the 2025 electric vehicle charging infrastructure construction tasks [EB/OL]. (2025-04-01)[2026-01-15]. https://drc.gd.gov.cn/gdsnyj/gkmlpt/content/4/4690/post_4690638.html#4247.
- [14] 杨庆新, 张献, 章鹏程. 电动车智慧无线电能传输云网 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 1–12.
Yang Q X, Zhang X, Zhang P C. Intelligent wireless power transmission cloud network for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 1–12.
- [15] Ye T, Huang Y P, Yang W J, et al. Safe multi-agent deep reinforcement learning for decentralized low-carbon operation in active distribution networks and multi-microgrids [J]. Applied Energy, 2025, 387: 125609.
- [16] 杨镜司, 秦文萍, 史文龙, 等. 基于电动汽车参与调峰定价策略的区域电网两阶段优化调度 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 58–71.
Yang J S, Qin W P, Shi W L, et al. Two-stage optimal dispatching of regional power grid based on electric vehicles' participation in peak-shaving pricing strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 58–71.
- [17] 郭庆来, 田年丰, 孙宏斌. 支撑能源互联网协同优化的隐私计算关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 2–14.
Guo Q L, Tian N F, Sun H B. Key technologies of privacy computation supporting collaborative optimization of energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 2–14.
- [18] 郑远硕, 李峰, 董九玲, 等. “车–路–网”模式下电动汽车充电时空灵活性优化调度策略 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 88–97.
Zheng Y S, Li F, Dong J L, et al. Optimal dispatch strategy of spatio-temporal flexibility for electric vehicle charging and discharging in vehicle–road–grid mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 88–97.
- [19] 高洪超, 王宣元, 邱小燕, 等. 新型电力系统环境下的虚拟电厂辅助调峰市场机制及其商业模式设计 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 376–385.
Gao H C, Wang X Y, Qiu X Y, et al. Ramping energy market mechanism and its business model of virtual power plants oriented to new power system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(3): 376–385.
- [20] 储典韬, 陈胜, 卫志农, 等. 基于动态交通流的电动汽车聚合灵活运行域刻画 [J]. 电网技术, 2026, 50(1): 261–271.
Chu D T, Chen S, Wei Z N, et al. Aggregated spatial-temporal flexibility of EVs with dynamic traffic flows [J]. Power System Technology, 2026, 50(1): 261–271.
- [21] 2024年为民办实事项目“存量充电桩智能化替代”工作启动 [EB/OL]. (2024-09-11)[2026-01-15]. <https://www.shhk.gov.cn/xwzx/002008/002008040/20240911/dc184da8-0272-4d80-8e95-1d6c90236e7f.html>.
Initiation of the 2024 public service project: Smart replacement of existing charging stations [EB/OL]. (2024-09-11)[2026-01-15]. <https://www.shhk.gov.cn/xwzx/002008/002008040/20240911/dc184da8-0272-4d80-8e95-1d6c90236e7f.html>.
- [22] 9个城市和30个项目列入首批车网互动规模化应用试点 [EB/OL]. (2025-04-25)[2026-01-15]. <https://www.nea.gov.cn/20250425/6c21959a140744a6bb35916e634cc9b6/c.html>.
Nine cities and thirty projects included in the first batch of large-scale vehicle–grid interaction application pilots [EB/OL]. (2025-04-25)[2026-01-15]. <https://www.nea.gov.cn/20250425/6c21959a140744a6bb35916e634cc9b6/c.html>.
- [23] 超1.7万车次参与深圳启动超大规模车网互动实测 [EB/OL]. (2025-03-29)[2026-01-15]. <https://www.news.cn/20250329/a49667a8d52c4e729cca3240b5a79ed0/c.html>.
Over 17 000 vehicle trips participated in Shenzhen's large-scale vehicle-to-grid interaction test [EB/OL]. (2025-03-29)[2026-01-15]. <https://www.news.cn/20250329/a49667a8d52c4e729cca3240b5a79ed0/c.html>.
- [24] 合肥成为全国首批车网互动规模化应用试点城市 [EB/OL]. (2025-04-02)[2026-01-15]. <http://www.ahjgbzw.gov.cn/content/detail/67ecf8707f8b9ad2078b456d.html>.
Hefei became one of the first pilot cities in China for large-scale

- application of vehicle network interaction [EB/OL]. (2025-04-02)[2026-01-15]. <http://www.ahjgbzw.gov.cn/content/detail/67ecf8707f8b9ad2078b456d.html>.
- [25] 国家试点率先落地 常州领跑车网互动新赛道 [EB/OL]. (2025-05-06)[2026-01-15]. http://www.changzhou.gov.cn/ns_news/40174650053210. National pilot program takes off in Changzhou, leading the way in new V2G arena [EB/OL]. (2025-05-06)[2026-01-15]. http://www.changzhou.gov.cn/ns_news/40174650053210.
- [26] 张△月, 祝琳. 美国《基础设施投资和就业法案》概况、进展及影响 [J]. 社会科学前沿, 2022 (5): 1580–1586. Zhang S Y, Zhu L. *The infrastructure investment and jobs act of the United States: Background, overview and impact* [J]. *Advances in Social Sciences*, 2022 (5): 1580–1586.
- [27] Meysam Q, Graeme H, Phil H. Flexibility in the GB power system: Future needs, alternative sources and procurement [R]. London: UK Energy Research Centre, 2025.
- [28] International Electrotechnical Commission. Conductive charging systems for electric vehicles—Part 1: General requirements (IEC PAS 61851-1: 2023) [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2023.
- [29] Wood Mackenzie & Energy Storage Association. U.S. energy storage monitor: Q4 2022 executive summary [R]. Boston: Wood Mackenzie, 2022.
- [30] National Grid ESO. Our electric future: Pathway to 2030 holistic network design [R]. Wokingham: National Grid ESO, 2023.
- [31] European Commission. Directorate-general for research and innovation. vehicle-to-grid to support grid stability and integrate renewable energy [R]. Brussels: European Commission, 2023.
- [32] Horesh N, Trinko D A, Quinn J C. Author correction: Comparing costs and climate impacts of various electric vehicle charging systems across the United States [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 5195.
- [33] Will C, Zimmermann F, Ensslen A, et al. Can electric vehicle charging be carbon neutral? Uniting smart charging and renewables [J]. *Applied Energy*, 2024, 371: 123549.
- [34] Sabadini F, Madlener R. Does taxation hamper the vehicle-to-grid business case? Empirical evidence from Germany [J]. *Applied Energy*, 2025, 381: 125041.
- [35] 刘栋晨, 季昱, 胡岳. 交能融合 V2G 技术研究与实践综述 [J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(1): 1–15. Liu D C, Ji Y, Hu Y. Summary of research and practice on V2G technology of transportation and energy fusion [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2025, 59(1): 1–15.
- [36] Su M, Wang H, Sun Y, et al. AC/DC matrix converter with an optimized modulation strategy for V2G applications [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(12): 5736–5745.
- [37] Zhang T R, Huang Y P, Liao H, et al. A hybrid electric vehicle load classification and forecasting approach based on GBDT algorithm and temporal convolutional network [J]. *Applied Energy*, 2023, 351: 121768.
- [38] Zhang Y, Heimler P, Abuogo J O, et al. Power cycling testing for power semiconductor switches: Methods, standards, limitations, and outlooks [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2026, 41(1): 849–869.
- [39] Jang Y C. Thermo-electrical reliability of power MOSFETs influenced by packaging architecture in stack-die and single-die configurations [J]. *Microelectronics Reliability*, 2025, 172: 115831.
- [40] Li H R, Zhang Z L, Wang S D, et al. A 300-kHz 6.6-kW SiC bidirectional LLC onboard charger [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(2): 1435–1445.
- [41] 刘秀兰, 陈熙, 张倩, 等. 充电桩充电模块功率器件故障诊断研究综述 [J]. 高压电器, 2024, 60(7): 191–200. Liu X L, Chen X, Zhang Q, et al. Review of power device fault diagnosis for charging module of charging pile [J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(7): 191–200.
- [42] Jiang S Q, Wang P B, Wang W, et al. An electromagnetically integrated LCL-EMI filter for V2G power converters: Topology, analysis, and implementation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(3): 2746–2757.
- [43] Liu Y T, Jin D H, Jiang S Q, et al. An active damping control method for the LLCL filter-based SiC MOSFET grid-connected inverter in vehicle-to-grid application [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3411–3423.
- [44] 徐玉珍, 邹中华, 刘宇龙, 等. 基于多尺度卷积神经网络和双注意力机制的 V2G 充电桩开关管开路故障信息融合诊断 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 2992–3002. Xu Y Z, Zou Z H, Liu Y L, et al. Information fusion diagnosis of switching tube open-circuit fault in V2G charging piles based on multi-scale convolutional neural network and dual-attention mechanism [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(8): 2992–3002.
- [45] Soliman I A, Tulsy V, Abd el-Ghany H A, et al. Holistic optimization of electric vehicle charging stations in radial power systems with V2G and DG integration considering fault repairing periods [J]. *Applied Energy*, 2025, 385: 125504.
- [46] Rao Z H, Wang S F. A review of power battery thermal energy management [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(9): 4554–4571.
- [47] Tie S F, Tan C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20: 82–102.
- [48] Mishra S, Choubey A, Reddy B A, et al. Enhancing EV lithium-ion battery management: Automated machine learning for early remaining useful life prediction with innovative multi-health indicators [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2024, 80(14): 20813–20860.
- [49] Ahn J, Lee Y, Han B, et al. A highly effective and robust structure-based LSTM with feature-vector tuning framework for high-accuracy SOC estimation in EV [J]. *Energy*, 2025, 325: 136134.
- [50] Rahmani P, Chakraborty S, Mele I, et al. Driving the future: A comprehensive review of automotive battery management system technologies, and future trends [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 629: 235827.
- [51] Hussien S A, BaQais A, Al-Gabalawy M. Estimation of the residual useful life of EV batteries using advanced hybrid learning tools [J]. *Electrical Engineering*, 2024, 106(3): 2651–2677.
- [52] Hakeem Akinlabi A A, Solyali D. Configuration, design, and

- optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 125: 109815.
- [53] Abdelhedi F, Jarraya I, Bawayan H, et al. Optimizing Electric Vehicles efficiency with hybrid energy storage: Comparative analysis of rule-based and neural network power management systems [J]. *Energy*, 2024, 313: 133979.
- [54] Sagaria S, van der Kam M, Boström T. Vehicle-to-grid impact on battery degradation and estimation of V2G economic compensation [J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124546.
- [55] He J G, Chen X Y, Ma M D, et al. Electric vehicle rental battery replacement and maintenance decisions [J]. *Energy*, 2025, 333: 137460.
- [56] Zhang J, Qiu J H, Lin X B, et al. Latency analysis and evaluation of C-V2X communications using the 5G Uu interface [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(24): 40506–40515.
- [57] 陆南昌, 付海芹, 贾国祖, 等. 基于 5G Uu 口的车路协同网络能力测试研究 [J]. *移动通信*, 2023, 47(12): 21–28, 43.
Lu N C, Fu H Q, Jia G Z, et al. V2X testing and research based on 5G Uu interface [J]. *Mobile Communications*, 2023, 47(12): 21–28, 43.
- [58] 陈永标. IEEE 1588 时间精确同步协议(PTP)在电力系统应用的可行性研究 [D]. 上海: 上海交通大学(硕士学位论文), 2009.
Chen Y B. Feasibility study on IEEE 1588 precise time synchronization protocol (PTP) application in power systems [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Master's thesis), 2009.
- [59] 黄曙, 崔全胜, 宋小会, 等. 电力系统 IEEE 1588 一致性测试研究 [J]. *电网技术*, 2012, 36(6): 89–94.
Huang S, Cui Q S, Song X H, et al. Study of IEEE 1588 conformance testing in electric power system [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(6): 89–94.
- [60] Kwon D, Son S, Park K, et al. Design of blockchain-based multi-domain authentication protocol for secure EV charging services in V2G environments [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(12): 21783–21795.
- [61] Miglani A, Kumar N. Blockchain-based co-operative caching for secure content delivery in CCN-enabled V2G networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(4): 5274–5289.
- [62] Pan B, Wu H. Modeling and analysis of multi-relay cooperative communications in C-V2X networks [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(9): 16371–16385.
- [63] Wolinetz M, Axsen J, Peters J, et al. Simulating the value of electric-vehicle – grid integration using a behaviourally realistic model [J]. *Nature Energy*, 2018, 3(2): 132–139.
- [64] Ma C Q, Pei M Y, Cai M, et al. Harnessing the power of electric taxis: A data-driven exploration of V2G potential in taxi service areas [J]. *Energy*, 2025, 324: 135997.
- [65] Alabi T M, Lu L, Yang Z Y. Data-driven optimal scheduling of multi-energy system virtual power plant (MEVPP) incorporating carbon capture system (CCS), electric vehicle flexibility, and clean energy marketer (CEM) strategy [J]. *Applied Energy*, 2022, 314: 118997.
- [66] 高扬, 胡泉, 吕天光, 等. 考虑车网互动和动态碳交易的多能源虚拟电厂数字孪生调控策略 [J/OL]. *电网技术*, 1–18 [2026-01-15]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0724>.
- Gao Y, Hu X, Lyu T G, et al. Digital twin regulation strategy for multi-energy virtual power plants considering V2G interaction and dynamic carbon trading [J]. *Power System Technology*, 1–18 [2026-01-15]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0724>.
- [67] 王仁浚, 高红均, 罗龙波, 等. 基于深度强化学习的新型配电系统优化运行研究综述 [J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(9): 152–164.
Wang R J, Gao H J, Luo L B, et al. Review of research on new distribution system optimization operation based on deep reinforcement learning [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(9): 152–164.
- [68] 朱仁浚, 沈小军, 董子航. 虚拟电厂的隐私保护技术研究现状与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(20): 16–33.
Zhu R Q, Shen X J, Dong Z H. Research status and prospects of privacy preservation technologies for virtual power plants [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(20): 16–33.
- [69] 马骏驰, 张源, 段宗涛, 等. 考虑充电需求的电动汽车行为策略研究综述 [J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(6): 66–79.
Ma J C, Zhang Y, Duan Z T, et al. Research review on behavior strategies of electric vehicles considering charging demands [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(6): 66–79.
- [70] 胡号, 胡志坚, 李天格, 等. 基于“车–桩–站”交互的充换电站一体化实时调度策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(11): 4175–4187.
Hu H, Hu Z J, Li T G, et al. Integrated real-time dispatching strategy of charging and swapping stations based on “vehicle–pile–station” interaction [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(11): 4175–4187.
- [71] Sun Z Y, He Y, Wu H B, et al. Bi-level planning of electric vehicle charging stations considering charging demand: A Nash bargaining game approach [J]. *Energy*, 2025, 332: 137137.
- [72] 吴佳琦, 张谦, 黄耀宇, 等. 计及电动汽车的综合能源系统多主体协同低碳经济调度 [J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(12): 36–47.
Wu J Q, Zhang Q, Huang Y Y, et al. Multi-agent collaborative low-carbon economic dispatch in integrated energy system considering electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(12): 36–47.
- [73] 李玉璟, 李泽宁, 郝军强. 基于多智能体深度强化学习的充电站实时协调定价方法 [J/OL]. *电力系统自动化*, 1–12 [2026-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20251112.1424.002>.
Li Y J, Li Z N, Hao J Q, et al. Real-time coordinated pricing method for charging stations based on multi-agent deep reinforcement learning [J/OL]. *Power System Automation*, 1–12 [2026-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20251112.1424.002>.
- [74] 陈厚合, 高远航, 李雪, 等. “车–桩–路–网”耦合下配电系统灵活域的构建方法 [J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(8): 44–52, 70.
Chen H H, Gao Y H, Li X, et al. Flexibility region construction method of distribution system under “EVs–charging piles–road–network” coupling [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(8): 44–52, 70.
- [75] 王华昕, 张高丽, 刘隽, 等. 计及用户贡献度的电动汽车主从博弈差异化充电套餐设计 [J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(10):

- 21–29.
Wang H X, Zhang G L, Liu J, et al. Design of differentiated charging package for electric vehicle based on stackelberg game considering user contribution [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(10): 21–29.
- [76] 毛玲, 张钟浩, 赵晋斌, 等. 车-桩-网交融技术研究现状及展望 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(24): 6357–6371.
Mao L, Zhang Z H, Zhao J B, et al. Research status and prospects of fusion technology of vehicle-charging pile-power grid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(24): 6357–6371.
- [77] 杨帅, 戴朝华, 郭爱, 等. 考虑负荷空间均衡和充电站合作博弈的快速充电定价机制 [J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(7): 190–200.
Yang S, Dai Z H, Guo A, et al. Fast charging pricing mechanism considering load space balance and cooperative game of charging stations [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(7): 190–200.
- [78] Dean N. Towards smarter car charging [J]. *Nature Energy*, 2023, 8(8): 773.
- [79] 侯治吉, 李成鑫, 刘广生. 电动汽车需求响应研究综述 [J]. *电测与仪表*, 2025, 62(9): 37–50.
Hou Z J, Li C X, Liu G S. Review of electric vehicle demand response research [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(9): 37–50.
- [80] 姜涛, 吴成昊, 李雪, 等. 考虑电动汽车充放电的输配协同能量-灵活性市场出清机制 [J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(7): 210–224.
Jiang T, Wu C H, Li X, et al. Clearing mechanism of energy and flexibility markets with transmission and distribution coordination considering charging and discharging of electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(7): 210–224.
- [81] 侯慧, 何梓娟, 侯婷婷, 等. 大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(14): 177–187.
Hou H, He Z Y, Hou T T, et al. A review of demand response strategies and potential evaluation for large-scale vehicle to grid [J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(14): 177–187.
- [82] 张越, 刘佳, 陈哲, 等. “车-路-站-网”耦合下基于动态吸引聚合的多类型充电站合作博弈优化 [J]. *电网技术*, 2025, 49(12): 5101–5112.
Zhang Y, Liu J, Chen Z, et al. Cooperative game optimization of multi-type charging stations based on dynamic attraction aggregation under vehicle-road-station-grid coupling [J]. *Power System Technology*, 2025, 49(12): 5101–5112.
- [83] 姜涛, 吴成昊, 李雪, 等. 计及V2G主动支撑的输配协同日前-实时优化调度 [J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(10): 87–100.
Jiang T, Wu C H, Li X, et al. Transmission and distribution coordinated day-ahead and real-time optimal scheduling considering active support of vehicle-to-grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(10): 87–100.
- [84] 郑颖颖, 缪新义, 王晖, 等. 支持时变需求响应激励价格的电动汽车优化充电策略 [J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(9): 96–106.
Zheng Y Y, Miao X Y, Wang H, et al. Optimal charging strategies for electric vehicles supporting time-varying demand response incentive price [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(9): 96–106.
- [85] 王义, 靳梓康, 王要强, 等. 基于混合博弈与电动汽车共享储能特性的园区综合能源系统协调优化运行 [J]. *高电压技术*, 2025, 51(1): 135–145.
Wang Y, Jin Z K, Wang Y Q, et al. Coordinated and optimized operation of park integrated energy systems based on hybrid gaming and electric vehicle shared energy storage characteristics [J]. *High Voltage Technology*, 2025, 51(1): 135–145.
- [86] 张卫国, 宋杰, 郭明星, 等. 考虑电动汽车充电需求的虚拟电厂负荷均衡管理策略 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(9): 118–126.
Zhang W G, Song J, Guo M X, et al. Load balancing management strategy for virtual power plants considering charging demand of electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(9): 118–126.
- [87] 王明深, 袁晓冬, 曾飞, 等. 电动汽车充电设施规划运行关键技术研究综述 [J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(5): 65–76.
Wang M S, Yuan X D, Zeng F, et al. Review of key technologies research for electric vehicle charging facilities planning and scheduling [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(5): 65–76.
- [88] Habib S, Ahmad F, Gulzar M M, et al. Electric vehicle charging infrastructure planning model with energy management strategies considering EV parking behavior [J]. *Energy*, 2025, 316: 134421.
- [89] 罗平, 杨泽喆, 张嘉昊, 等. 考虑多场景充电需求预测的电动汽车充电站规划 [J]. *高电压技术*, 2025, 51(1): 368–378.
Luo P, Yang Z Z, Zhang J H, et al. Electric vehicle charging station planning considering multi-scene charging demand forecasting [J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(1): 368–378.
- [90] 朱继忠, 何晨可, 陈婧韵, 等. 综合能源系统环境下电动汽车充换电设施规划综述 [J]. *南方电网技术*, 2022, 16(1): 14–32.
Zhu J Z, He C K, Chen J Y, et al. Overview of electric vehicle charging and swapping facilities planning under the environment of integrated energy system [J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(1): 14–32.
- [91] 王震坡, 张瑾, 刘鹏, 等. 电动汽车充电站规划研究综述 [J]. *中国公路学报*, 2022, 35(12): 230–252.
Wang Z P, Zhang J, Liu P, et al. Overview of planning of electric vehicle charging stations [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(12): 230–252.
- [92] 陈翠峰, 林镇宏, 黄焯坤, 等. 交通能源转型决策分析综述 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(1): 32–48.
Chen C F, Lin Z H, Huang C K, et al. Review of decision-making analysis for transportation energy transition [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2025, 53(1): 32–48.
- [93] 比亚迪股份有限公司. 获取电池包的特征拐点的方法、BMS、电池包及用电设备: CN120595122A [P]. 2025-09-05.
BYD Company Limited. Method for obtaining characteristic inflection points of battery packs, BMS, battery packs and electrical equipment: CN120595122A [P]. 2025-09-05.
- [94] 国网北京市电力公司, 国家电网有限公司, 北京中电普华信息技术有限公司. 基于V2G的电网容量调节方法和装置: CN202411146417.9 [P]. 2024-11-26.
State Grid Beijing Electric Power Company, State Grid Corporation of China, Beijing Zhongdian Puhua Information Technology Co., Ltd. A V2G-based method and device for grid capacity

- regulation: CN202411146417.9 [P]. 2024-11-26.
- [95] 中国南方电网有限责任公司. V2G参与的群体微电网能量交易与协同调度联合优化方法: CN202510605271.8 [P]. 2025-09-26. China Southern Power Grid Co., Ltd. Joint optimization method for energy trading and coordinated dispatching of group microgrids with V2G participation: CN202510605271.8 [P]. 2025-09-26.
- [96] 特来电领充新能源科技有限公司. 一种特种车辆的充电控制方法、装置、充电机及特种车辆: CN202210110781.4 [P]. 2022-03-29. Teldian Lingchong New Energy Technology Co., Ltd. A charging control method, device, charger, and special vehicle for special vehicles: CN202210110781.4 [P]. 2022-03-29.
- [97] 万帮数字能源股份有限公司, 万帮星星充电科技有限公司. 功率分配装置和充电桩: CN202422652263.2 [P]. 2025-08-08. Wanbang Digital Energy Co., Ltd., Wanbang Star Charging Technology Co., Ltd. Power distribution device and charging pile: CN202422652263.2 [P]. 2025-08-08.
- [98] 华为技术有限公司. 一种优化的调度方法及管理设备: CN201310557049.2 [P]. 2016-11-23. Huawei Technologies Co., Ltd. An optimized scheduling method and management device: CN201310557049.2 [P]. 2016-11-23.