DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.05.013

从车网互动到车–机–网互动：演进逻辑、典型场景与发展路径

卢国文[1]，吴亚雄[1]，王宇洋[2]，羿应棋[2]，林子茵[2]，张勇军[2*]

（1. 中国南方电网有限责任公司，广州 510200；2. 华南理工大学电力学院，广州 510640）

摘要：随着新型电力系统建设和低空经济发展，源荷协同的覆盖范围正在由电动汽车逐步拓展至低空电动终端及配套补能设施，互动主体、空间边界、协同机制随之拓展。本文面向车–机–网互动（VAMG）这一新型源荷互动形态，界定了VAMG的基本内涵，明确了电动汽车、低空飞行器在任务类型、时间尺度、空间特征、运行约束方面的差异，对比分析了两类资源的能量特性。阐述了从车网互动到VAMG的演进逻辑和多维价值，以物流无人机典型应用场景为例评估了低空飞行器参与源荷互动的调节潜力，归纳出共享补能设施、空地联合任务、应急保障三类VAMG场景。提炼了状态透明化感知、空地异构终端补能控制、低空节点接入协同规划、多时间尺度能量流优化调度等关键技术，探讨了从车网互动既有商业模式转向VAMG复合模式的演进路径。VAMG仍处于概念验证向工程示范的过渡阶段，未来的产业化发展需要完善标准体系、电网准入、市场机制、产业协同、政策引导等配套条件，以构成交能融合重要形态，为提升电网灵活性、交通运行效率、城市韧性提供新路径。

关键词：车–机–网互动；低空飞行器；柔性负荷；源荷协同；新型电力系统；低空经济

中图分类号：TM73　　**文献标识码：**A

From Vehicle-to-Grid to Vehicle–Aerial Mobility–Grid Interaction: Evolutionary Logic, Typical Scenarios, and Development Pathways

Lu Guowen[1], Wu Yaxiong[1], Wang Yuyang[2], Yi Yingqi[2], Lin Ziyin[2], Zhang Yongjun[2*]

(1. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510200, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With the development of new–type power systems and the low-altitude economy, the scope of source–load coordination is gradually expanding from electric vehicles to low-altitude electric terminals and their supporting energy-replenishment facilities. Accordingly, the participating entities, spatial boundaries, and coordination mechanisms are also being extended. Against this background, this study investigates vehicle–aerial mobility–grid (VAMG) interaction as an emerging form of source–load interaction. It defines the fundamental concept of VAMG interaction, analyzes the differences between electric vehicles and low-altitude aircraft in terms of mission types, time scales, spatial characteristics, and operational constraints, and compares the energy characteristics of these two resource types. Moreover, the study analyzes the evolutionary logic from vehicle-to-grid (V2G) to VAMG interaction and

收稿日期：2026-05-13；**修回日期：**2026-09-24

通讯作者：*张勇军，华南理工大学电力学院教授，研究方向为智能配电网、配电网优化与规划；E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“广东省新能源与人工智能产业融合发展战略研究”(2025-DFZD-27)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

multidimensional values of VAMG interaction. Meanwhile, the flexibility potential of low-altitude aircraft participating in source–load interaction is quantitatively evaluated using typical application scenarios of logistics unmanned aerial vehicles as examples. Three typical VAMG scenarios are identified: shared energy-replenishment infrastructure, air–ground collaborative missions, and emergency support. Key technologies are summarized in terms of transparent state sensing, energy replenishment control of heterogeneous ground and aerial terminals, coordinated planning for the grid integration of low-altitude nodes, and multi-timescale energy-flow optimization and scheduling. The evolutionary pathway from the existing V2G business model toward a composite VAMG model is also discussed. The analysis suggests that VAMG interaction remains in transition from conceptual validation to engineering demonstration. Further commercialization and industrial deployment require improvements in standards systems, grid-access rules, market mechanisms, industrial coordination, and policy guidance. With these supporting measures in place, VAMG interaction is expected to become an important form of transport – energy integration, offering new pathways for enhancing grid flexibility, transportation efficiency, and urban resilience.

Keywords: vehicle–aerial mobility–grid interaction; low-altitude aircraft; flexible load; source–load coordination; new-type power system; low–altitude economy

一、前言

受“双碳”目标驱动，新型电力系统建设提速，高比例新能源接入使电力系统运行的波动性与不确定性增加，需求侧灵活性资源的开发利用与源荷互动需求凸显[1-2]。近年来，电动汽车（EV）保有量持续增长[3]，在停放、补能、并网调节等方面逐步表现出可观、可聚合的灵活性资源属性；以车网互动（V2G）为代表的互动技术推动交通终端由单纯受电负荷向需求侧灵活性资源演变，体现出交能融合的发展趋势[4]。有序充电、反向放电在电网“削峰填谷”、调频备用、促进新能源消纳等方面具有重要价值，V2G基础设施、平台技术体系、示范应用及规模化发展等得到高度关注[5-8]。

国际能源署预测，2030年全球EV保有量（不含两／三轮车）将为2.5亿辆，较2024年增长4倍[9]；中国汽车工程学会发布的《节能与新能源汽车技术路线图3.0》（2026年）认为，未来5~15年新能源汽车将成为汽车市场的主流产品。至2040年，新能源乘用车渗透率将超过85%，其中EV占比接近80%[10]。这些预判表明，未来一段时间内EV仍是交通侧参与电网调节的主体资源，继续承担主要的规模化调节功能。与此同时，我国将低空经济纳入“十五五”规划纲要，低空经济进入加速发展期。无人机（UAV）、电动垂直起降飞行器（eVTOL）等低空（电动）飞行器将是低空经济发展的重要载体，相应产业扩张将进一步推动低空交通用能需求增长，带来新的灵活性资源形态[11-12]。我国低空经济产业规模2030年可达2万亿元，2035年可达5.1万亿元[13]。

与传统EV主要受出行需求、停驻时间、电池状态影响不同，低空飞行器的补能行为与飞行任务强耦合，受到任务时序、续航安全、空域、气象、起降节点等多重约束。随着机巢、垂直起降场等低空补能设施逐步接入配电网，低空任务需求将与电网运行形成深度耦合；特别是在EV和低空飞行器共享补能设施、站端储能、局部配网容量时，两类终端的运行与补能决策相互影响，难以由既有V2G或低空交通调度框架来独立处理。面向上述新发展形势，本文提出车－机－网互动（VAMG）技术框架，围绕互动内涵、资源潜力、典型场景、发展路径开展分析，重点讨论低空飞行器纳入后系统互动关系的演变、调节能力形成机制、产业发展方向，为低空补能设施有序接入配电网及空地资源协同规划与运行提供参考。

二、车－机－网互动的基本内涵与独特价值

（一）车－机－网互动内涵

依托双向充放电装备、通信协议、聚合调度平台，使EV在满足出行需求前提下参与电网“削峰填谷”、调频备用、需求响应等电力系统服务[14-15]，是V2G的基本内涵，相应工程实现呈现“车端－桩端－平台－电网／市场”多层结构，突出能量流、信息流、控制流的整体协同[16]。VAMG源于传统V2G，并非将低空电动终端简单纳入既有V2G框架，而是重点探讨飞行任务、低空运行约束、补能节点、配电网安全边界共同作用下的跨域耦合问题。为此，将研究对象由车扩展为车+机，其中机主要指以电池和电驱系统为能源单元，可在低空执行物流配送、巡检作业、应急响应、载人接驳等任务的UAV和eVTOL[17-19]。由此，低空电动终端的引

入增加了飞行任务、续航安全、空域、气象、起降节点等约束，而机巢、垂直起降场等设施既承担起降、补能、任务调度等功能，又是低空交通与配电网发生能量耦合的重要节点[20-21]。低空电动终端的引入并非简单增加一类V2G的互动对象，而是使系统关系由“出行–充放电–电网”进一步演变为“地面出行–低空任务–补能节点–电网”的跨域耦合。

本研究将VAMG界定为：在保障EV出行需求、低空飞行任务安全的前提下，以充电桩、充换电站、机巢、垂直起降场等补能基础设施为物理接口，聚合平台、配电网调度系统为协同枢纽，能量互动为核心，信息与控制交互为协同手段，地面出行、低空飞行任务为外部运行约束，实施能量流、信息流、控制流协同的空地交通–能源互动形态（见图1）。需要指出的是，车、机在VAMG中的电网角色及互动能力并不对称：EV在具备双向充放电条件时可兼具柔性负荷、双向调节资源属性；UAV、eVTOL受飞行任务、续航安全、适航要求等约束，现阶段主要表现为任务驱动型柔性负荷，可调节性体现为补能时序、补能功率、补能节点的协调。VAMG中的互动强调车、机与电网之间能量、信息、控制作用的闭环协同，而非以车、机均具备向电网反送电能力为前提。

VAMG成立不仅要求系统中同时存在车、机，而且取决于车、机能否通过共享设施、任务链、配网容量形成不可独立分解的跨域约束。当车、机两类终端通过共享补能设施、站端储能、局部配网容量、空地任务链发生耦合时，任务安排、补能需求、电网运行将相互影响；此时系统不再是两个独立问题的简单叠加，而是形成VAMG联合规划与运行问题。VAMG需要重点研究的科学问题集中在三个方面。① 空地异构交通状态与任务–能量映射关系的统一表征机理，即在统一时空框架下描述EV出行状态、UAV与eVTOL飞行任务、补能节点状态、配电网运行状态，揭示不同交通任务向电力负荷映射的机理。② 低空任务可行域与电网运行边界的交互耦合机理，即描述飞行任务安全、续航、起降约束与补能节点容量、配电网承载能力之间的相互作用，明确VAMG联合运行的可行边界。③ 多时间尺度下车–机–网协同运行决策机制，即协调车辆相对宽松的充放电时间窗、低空飞行器高频任务周转、电网多时间尺度运行调度等需求，追求任务完成率、安全性、经济性之间的动态平衡。

从概念辨析角度看，VAMG与V2G、车对外界的信息交换（V2X）、“车能路云”、车机协同、交能融合等既有概念存在联系，但研究对象和核心问

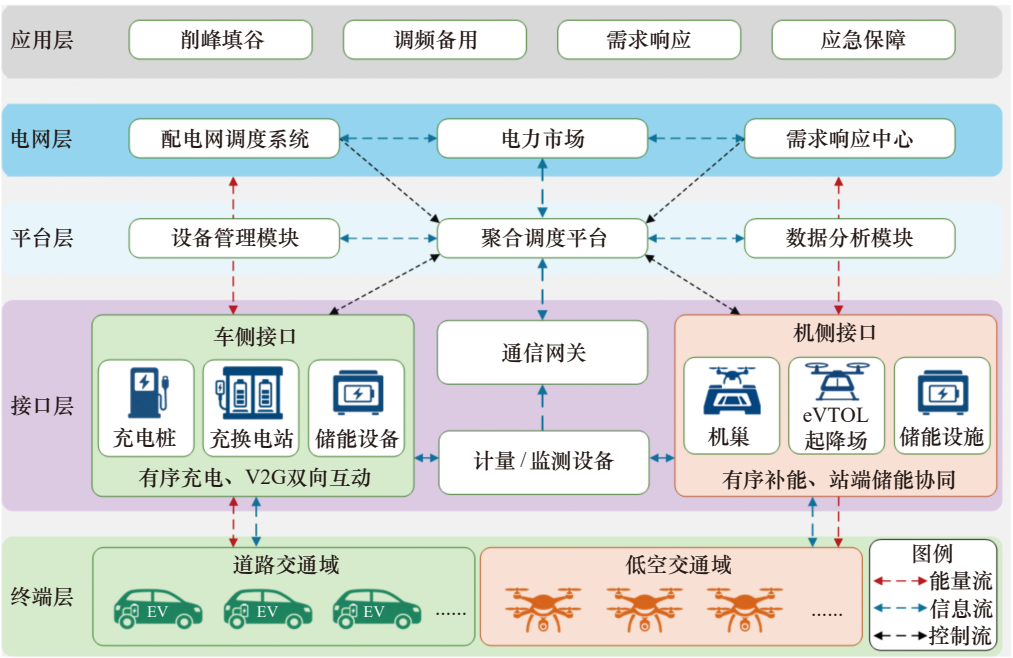


图1　VAMG多层级架构

题有所不同。V2G主要关注EV充放电与电网运行之间的互动，与VAMG的区别在于不涉及低空飞行器。V2X[22]、“车能路云”[23]侧重车辆与道路、通信、云平台之间的信息协同，与VAMG的区别分别在于不涉及与电网互动、不涉及低空交通网。车机协同[24]主要面向空地物流、路径规划、任务组织，与VAMG的区别在于不涉及与电网互动。交能融合[25]涉及公路、铁路、水运、航空等交通系统与能源系统的耦合，与VAMG的区别在于不涉及各类交通工具之间的协同。本研究提出VAMG并非用于替代上述概念，而是进一步聚焦EV、低空飞行器、空地补能节点同时受车辆出行、低空任务、电网运行约束时产生的跨域协同问题。

（二）车、机的能量特性对比

从资源属性角度看，车、机的差异主要体现在任务类型、容量功率、时空特征、调节能力、运行约束等方面（见表1）。机主要包括UAV、eVTOL，而UAV、eVTOL在电池容量、补能功率、任务组织、安全约束等方面也存在明显差异，因而在资源特性、调节能力分析时需要分别讨论。

车的能量特性主要体现在接入规模大、调节持续性强、聚合基础较成熟[26]。EV的运行主要受通勤、客运、物流等地面出行需求的约束，在停车和充电阶段通常具有较宽的时间窗口，可通过有序充电来调整负荷时序；在具备双向充放电条件时，部分EV还可进一步参与反向放电。因此在电能调节层面，EV更适合形成规模化、持续时间较长的聚合调节资源。

机的能量特性主要体现在任务机动性强、可跨越地面障碍，在应急到达、空间覆盖等方面具有较高的任务响应效率[27-28]。UAV的单体电池容量、补能功率均较小，主要承担巡检、物流、农业、应急等任务，可调节性体现在由飞行任务驱动的补能时序、充电功率、补能节点的选择上。eVTOL具有更大的电池容量、更高的补能功率，主要面向载人、重载物流等场景，运行通常受航班计划驱动，补能需求集中在垂直起降场等固定节点，受到适航、航班安全、场站容量方面的更严格约束，调节重点主要是航班之间的补能次序、场站峰值功率控制。

可见，车、机与电网的能量互动特性具有明显的非对称性：EV以规模化充放电为主，UAV更突出高频、短时、分散式补能，eVTOL表现为集中式高功率补能负荷及其时序调节潜力。虽然这三类资源在单体容量、功率等级、调节持续时间方面存在明显差异，但是在共享补能设施、站端储能、局部配网容量约束下可通过差异化调度形成互补。

（三）从车网互动到车－机－网互动的演进逻辑

随着交通终端电动化范围的不断拓宽，从V2G到VAMG演进的根本动力源自新型电力系统背景下系统对灵活性资源需求扩大、低空基础设施规模化建设的共同作用。在早期，V2G主要解决EV规模化接入后的充电负荷管理问题，重在通过有序充电降低峰值负荷。随着双向充放电技术的发展，EV进一步由单纯受电负荷转变为可参与电网“削峰填谷”、需求响应服务的灵活性资源。在低空经济加速发展的背景下，源荷协同对象进一步扩展至低空任务型补能负荷及其配套设施。与电网的互动对象由车扩展至车+机，互动空间由地面道路延伸至低

表1　车、机的能量特性对比

比较维度	车（EV）	机	
		UAV	eVTOL
任务类型	通勤、客运、物流	巡检、物流、农业、应急	载人、重载物流
电池容量	40~100 kW·h[26,29-30]	0.15~4.8 kW·h[31-32]	130~300 kW·h[18,33-34]
补能功率	7~120 kW[26,29-30]	0.24~18 kW[31-32]	直流快充功率为300~1000 kW[18,33-34]
时间特征	停驻较长、窗口较宽[35]	续航较短[36]，补能频繁、任务窗口较短	航班计划驱动，高功率补能具有集中性
空间特征	沿道路移动，网点相对固定[37]	跨区域飞行，机巢分散	航路固定，场站集中
可调能力	容量大[38]、可调节充电功率，部分场景可反向放电	任务约束较强[31]，主要调节补能时序、功率及节点	补能需求集中，主要调节航班间补能次序和充电功率
主要约束	出行需求、桩位条件、电池寿命	任务、空域、气象、续航[33]	航班、适航、场站容量

空航路，但电气互动仍主要发生于机巢、起降场等地面补能节点，互动方式由单一充放电控制演进为统筹车机补能计划、空域管制要求、电网运行约束的多目标协同优化。

进一步看，VAMG关键在于形成车、机之间的协同关系。EV可作为移动补能、换电、通信、物资保障载体，为低空飞行器连续作业提供支撑；低空飞行器可在巡检、物流、应急救援等场景中为车辆路线规划、交通管控、应急配送等提供快速空中支援；二者之间并非简单的能量互动，而是通过任务协同、能量互济、空间互补的形式构成多元化的空地协同模式。因此，VAMG不仅是V2G在资源形态、空间范围、互动对象、协同机制上的系统升级，也是在交通终端电动化、低空基础设施网络化、电网灵活性需求提升的共同驱动下，“源网荷”互动由地面单域向空地跨域协同的演进。

（四）车–机–网互动的多维价值

VAMG的价值并不局限于单一的电网调节功能，而是体现为电网运行、交通运输、交能耦合三个层面的综合效应。随着补能设施、聚合平台、市场机制的不断完善，VAMG有望成为支撑新型电力系统、绿色交通、低空经济协同发展的重要载体。

从电网运行角度看，VAMG可进一步提高电网灵活性调节能力。EV保有量大、接入点广，具备参与电网“削峰填谷”、需求响应的现实基础[39-40]。UAV、eVTOL依托机巢、起降场等设施运行，补能需求具有较强的任务驱动性和时空迁移特征。通过协调机侧补能时序与节点、EV充放电、站端储能运行，可降低车、机集中补能形成的局部负荷峰值，提高复合补能节点的资源利用效率[41]。现阶段，机侧对电网灵活性的贡献主要体现在需求侧补能柔性的挖掘，而非飞行器本体直接提供容量支撑。

从交通运输角度看，VAMG可促进空地交通协同组织能力的提升。EV适合承担城市道路交通、园区物流、干线物流等中长距离运输与地面接驳任务，UAV、eVTOL适合承担末端配送、跨障碍通达、快速巡检、应急投送等高时效任务；二者协同将推动交通服务由单一地面出行向“地面运输+低空补充”的复合模式演进，从而提升交通系统在拥堵、灾害等特殊任务场景下的服务效率与可达性[42]。

从交能耦合角度看，VAMG可拓展传统V2G主要面向道路交通终端的互动边界，将地面EV、低空飞行器及其补能设施共同纳入交通与能源协同体系[34,43]。通过充电桩、充换电站、机巢、垂直起降场等设施的协同规划与运行，支持道路交通流、低空任务流、电力能量流的协同，提升基础设施的复合利用效率。同时，低空物流、巡检、城市空中交通等低空经济场景开始规模化落地，将进一步催生补能、运维、调度、能源管理需求，拓展空地交通能源协同服务模式，为交通能源融合和低空经济发展创造产业增长空间。

三、车–机–网互动潜力的量化分析

EV、UAV、eVTOL在容量规模、时间尺度、空间机动性方面具有明显差异，互动能力并非简单叠加，而是由资源规模、任务需求、运行约束共同决定。有必要从资源规模、负荷特性、可调能力等方面出发，对VAMG潜力进行量化分析。

相较于EV，UAV具有单机电池容量小、补能频率高、任务约束强等特点，然而额定电池容量不能直接等同于可供电网调用的调节容量。例如，将规模化UAV充电负荷接入改进IEEE 33节点配电系统，分析对峰值负荷和网络损耗的影响[44]。鉴于物流配送是UAV当前应用的重要场景且未来具有规模化应用潜力，本研究以物流场景中的UAV为对象并参考EV，对相应的能量互动潜力进行量化分析。

参照可调负荷聚合、交通资源时空灵活性建模思路[45-46]，设置各类测算参数（见表2）。其中，有

表2　UAV与EV调节潜力测算参数

参数	含义	说明
i	资源类型	$i \in \{\mathrm{UAV},\ \mathrm{EV}\}$
N_i	第i类资源总数	架/辆
α_i	有效参与系数	实际可参与调节的资源数量在总量中的比例，%
p_i	单体充电功率	kW
E_i	电池额定容量	kW·h
ΔSOC_i	电池荷电状态（SOC）可调空间	%
T	可调时长	h

效参与系数α_i用于表征一定区域内EV、UAV等负荷资源处于充电且可调状态的数量占比，主要取决于不同类资源的充电行为、电池容量。对于EV类资源，电池容量较大，充电行为主要由用户出行习惯决定，单个站点的充电同时率一般较小，α_i取为10%~20%；对于UAV类资源，电池容量和物流任务特点决定充电的集中度、同时率较高，α_i取20%~30%。目前相关公开数据缺乏，上述参数仅用于开展条件化的数量级测算。参照文献[47]，EV或UAV资源的可调功率$P_{\text{flex},i}$为：

$$P_{\text{flex},i}=N_i\times\alpha_i\times p_i \tag{1}$$

给定时段T内的可转移充电电量$E_{\text{flex},i}$为：

$$E_{\text{flex},i}(T)=\min[P_{\text{flex},i}\times T,\ N_i\times\alpha_i\times E_i\times\Delta SOC_i] \tag{2}$$

UAV可调功率相对于该区域配电变压器峰荷的比值η_{grid}为：

$$\eta_{\text{grid}}=\frac{P_{\text{flex, UAV}}}{P_{\text{peak, 0}}} \tag{3}$$

式（3）中，$P_{\text{flex, UAV}}$为UAV资源的可调功率；$P_{\text{peak, 0}}$为UAV接入前配电变压器的有功负荷峰值。

在低空物流场景中，设有10~100架UAV接入单个补能站，补能站就近接入1台容量为400 kVA的配电变压器。设配电变压器的负荷功率因数为0.95、峰时负载率为70%，则有功负荷峰值为266 kW。选取DJI FlyCart 200作为物流UAV的测算机型，双电池运行时机载电池容量约为4.8 kW·h[32]，单相、三相交流输入条件下的额定功率分别为3 kW、18 kW。为统一比较口径，本算例的基准场景采用3 kW单相充电功率，ΔSOC_i设为60%，短时调节时长设为0.5 h，测算结果如表3所示。在α_i为20%~30%时，UAV群的可调功率随聚合规模增加而明显提升。当机群规模由10架增至100架时，可调功率由6 kW增至90 kW，占配电变压器有功峰值负荷的33%以上。在0.5 h短时尺度下，可转移电量主要受聚合可调功率约束，最高为45 kW·h。可见，尽管UAV单体充电功率有限，但规模化聚合后可形成一定的短时充电负荷调节能力。

表3　不同UAV可调潜力

UAV数量	$P_{\text{flex},i}$/kW	$E_{\text{flex},i}(0.5)$/(kW·h)	η_{grid}/%
10	6~9	3~4.5	2.3~3.4
50	30~45	15~22.5	11.3~16.9
100	60~90	30~45	22.6~33.8

进一步，设置同一配电网接入场景，假设UAV、EV两类资源具有相同的规模、充电设施和配电设备容量不构成额外约束，以比较两类资源的充电和调节特征。考虑两类资源在补能频次、充电集中度方面的差异性，UAV、EV的α_i分别取20%、10%。UAV参数仍取DJI FlyCart 200，EV单车电池容量、交流充电功率分别取60 kW·h、7 kW[29-30]，则两类资源的可调功率比$R_P=\frac{P_{\text{flex, UAV}}}{P_{\text{flex, EV}}}=\frac{\alpha_{\text{UAV}}\times p_{\text{UAV}}}{\alpha_{\text{EV}}\times p_{\text{EV}}}=$85.7%。若两类资源的$\Delta SOC_i$也相同，则同等规模群可转移电量上限比为$R_E=\frac{(N\times\alpha\times E\times\Delta SOC)_{\text{UAV}}}{(N\times\alpha\times E\times\Delta SOC)_{\text{EV}}}=\frac{\alpha_{\text{UAV}}\times E_{\text{UAV}}}{\alpha_{\text{EV}}\times E_{\text{EV}}}=16\%$。

可见，虽然UAV单体充电功率、电池容量均小于EV，但在较高的α_i条件下，群体聚合效应可以部分弥补单体容量不足。在本研究的基准情景下，同等保有规模的UAV群短时可调功率约为EV群的85%，而UAV群的理论可转移电量上限约为EV群的16%。这表明，UAV的相对调节潜力更多体现在短时功率调节，而长时能量调节能力明显弱于EV。当然，该结果仅反映同等保有规模、所设参与水平下的条件化数量级比较，并不能表示现阶段UAV群总体调节规模已接近EV群。

此外，物流UAV具有任务频次高、日内多次补能的运行特征，单次补能电量可在多次任务周转过程中持续累积。在高利用率场景下，UAV群仍可形成连续或重复出现的充电负荷，对局部配电网的负荷峰值水平产生不可忽视的影响。

四、车－机－网互动的典型场景

根据车、机、网耦合关系的形成机制，将VAMG典型场景归纳为共享补能设施、空地联合任务、应急保障三类（见图2）。

（一）共享补能设施下的车－机－网协同场景

该场景主要面向高速服务区、综合交通枢纽、物流园区、产业园区等空地交通终端集中区域，将EV充换电设施、机巢、垂直起降场等共同接入局部配电网，形成车、机共享配变容量、分布式电源、站端储能的复合补能节点[20, 48]。与传统的单一交通终端补能场景相比，此类节点同时承载地面交

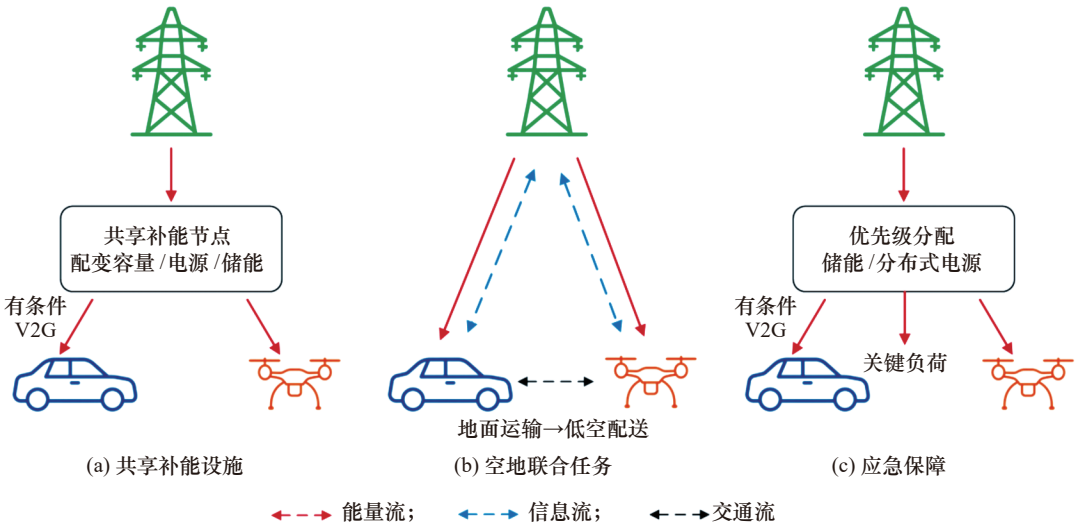


图2 VAMG典型场景

通、低空交通用能需求，EV充电负荷具有规模大、停驻时间相对长的特征，低空飞行器受飞行任务和高频周转影响而致补能需求更加集中且具有较强的时序波动性[49]。当两类终端在同一区域集中接入并共享供能设施时，补能需求在时间和空间上的叠加可能进一步抬升局部负荷峰值，进而引起配变重载、电压越限、配网扩容需求增加等问题[50]。同时，分布式光伏出力、站端储能状态、车机到离站规律等均具有较强的不确定性，使复合补能节点的供需平衡、运行管理更加复杂[51-52]。

应在保障EV出行需求、低空飞行任务安全的前提下，统筹EV有序充电及具备条件车辆的反向放电、UAV与eVTOL补能时序及功率、站端储能充放电、分布式电源消纳，根据节点负荷水平、配网运行状态来动态调整不同终端的补能计划，促进车、机补能需求与配网承载能力的协调。该场景下需要考虑车、机、网协同的根本原因在于，车、机在共享补能设施和局部配网容量后形成显著的能量耦合具有接入空间集中、补能需求叠加、容量约束共享、调节资源互补等特点。为此，该场景重在深入挖掘EV充放电柔性、机侧补能柔性、站端储能调节能力，通过多类资源协同来缓解集中补能对局部配电网的运行压力，提高复合补能设施及配网容量的利用效率。

（二）空地联合任务下的车－机－网协同场景

该场景主要面向物流配送、交通接驳、园区运输等具有空地任务衔接关系的业务。其中，EV承担干线运输、区域配送、地面接驳任务，UAV、eVTOL发挥跨障碍、高时效、空间路径灵活等优势来承担末端配送、紧急投送、低空接驳任务，形成“地面运输+低空配送”的复合运输模式[38,53]。与共享补能设施场景中主要由供能设施、配网容量共享引发车、机耦合不同，该场景中车、机之间首先通过运输任务形成业务关联，随后通过任务执行过程中的补能需求与电网发生关联。特别是在物流枢纽、综合交通站点、大型园区等处，车辆到达、货物转运、飞行器起降、终端补能通常具有明确的前后衔接关系，使空地交通运行状态与能源需求呈现较强的时序耦合性[54]。

具体而言，EV的到达时间、运输路径、任务完成状态会影响UAV、eVTOL的起飞时刻、任务批次、补能窗口，飞行任务的频次、航程、载荷、续航安全要求又决定机侧电量消耗和补能需求。当任务密度升高、空地接驳时间集中时，车、机补能需求可能在短时间内同步增加，对局部配网提出较大的功率需求[55]。同时，电价变化、补能设施容量、站端储能状态、配电网运行约束等，也会反向影响空地任务组织[56]。因此，交通任务安排、能源调度之间形成明显的双向影响关系。

在此基础上，统筹空地任务组织、EV充放电计划、UAV和eVTOL补能时序与功率、站端储能运行、配网运行状态，可在满足车辆出行、飞行安全、任务时效的前提下促进交通任务与能源供给的

协同优化。该场景下需要考虑车、机、网协同的根本原因在于，空地任务链使车、机运行状态和补能需求产生内在关联，进而经由补能节点传导至电网运行。典型特点是任务关联性强、时间约束紧、能量需求随任务动态变化、交通与电网运行相互反馈。与单纯的车、机路径规划或物流协同相比，VAMG不仅需要考虑任务的执行路径，还应进一步解决任务产生的能源需求与电网供能能力协调，从而保持任务流、交通流、能量流的协同运行。

（三）应急保障下的车－机－网协同场景

在极端天气、自然灾害、设备故障、局部停电等应急状态下，配电网可能出现供电能力下降、局部线路失电、关键负荷供能不足等问题[57]。同时，灾情勘察、故障巡检、物资投送、应急通信等低空任务迅速增长，使电力供应受限、应急交通用能需求同步出现[58-59]。此时，EV可依托有序充放电、V2G能力参与局部能源支撑，在满足基本出行需求的前提下为关键负荷、综合补能节点提供一定的调节能力。UAV主要承担灾情勘察、设备巡检、通信中继、小型应急物资投送等任务，eVTOL适合承担人员接驳、重载物资运输、远距离应急运输任务，UAV、eVTOL的持续作业需要机巢、垂直起降场等节点提供稳定的补能保障。

与常态运行相比，应急状态下的VAMG具有更加突出的资源约束和任务优先级特征[60]。一方面，局部电网可能因故障隔离、供电通道受损而只能维持有限供能能力，站端储能、EV可调能力、分布式电源等资源成为重要的灵活供能手段。另一方面，UAV、eVTOL执行的巡检、通信、救援、物资运输等任务具有较强的时效性和连续性，相应补能需求难以简单按照常规的经济调度原则来削减或延后[61]。因此，在关键负荷供电、EV用能需求、机侧应急补能需求共存时，应根据任务重要程度、资源剩余容量、电网恢复进程对有限能源进行动态分配。若缺乏协调，可能出现车侧充电占用有限容量、机侧补能不足导致应急任务中断、站端储能过度释放而影响后续持续保障能力等问题。

应急状态下需要联合考虑EV可调能力、站端储能、分布式电源、机侧任务补能需求、关键负荷供电需求，根据电网故障范围、任务优先级、资源可用状态来动态制定能源分配策略。在供能能力严重受限时，可降低非紧急EV充电功率、调用具备条件车辆的反向放电能力，以将有限容量优先用于关键负荷、高优先级低空任务；随着配网逐步恢复，再动态调整车、机补能计划和储能运行方式。该场景下开展车、机、网协同的核心原因在于，电网供能能力下降、低空应急任务需求增加同时发生，使有限能源供给、高优先级任务保障形成直接耦合。供能资源受限、任务优先级突出、运行状态快速变化、能源配置具有明显的阶段性和动态性，是该场景的主要特点。

五、车－机－网互动关键技术与商业模式

（一）车－机－网互动关键技术

VAMG涉及车侧调节资源、机侧任务型补能负荷、补能设施、站端储能、配电网等多个主体的耦合，工程实现需形成覆盖状态认知、终端控制、设施配置、运行调度的技术支撑体系。基于“感知－控制－规划－调度”的逻辑关系，将VAMG关键技术划分为四个层面。

1. “车－机－站－网”互动状态透明化感知技术

状态透明化是VAMG的前提。现有的V2G感知主要依托车联网、充电设施监控平台、配网量测系统来获取车辆SOC、接入位置、停驻时间、充放电功率、节点运行状态[62]。低空运行系统监测飞行器位置、航线、任务状态、电池状态、气象条件、空域活动[63]。EV、低空飞行器的单体状态感知已具有一定的技术基础，相应架构分为平台集中式、分布式自主感知、“端－边－云”分层协同感知[64]。

在集中式架构中，各主体将量测数据统一上传至中心平台，由平台执行状态融合、预测、异常识别，利于形成统一全局状态，但通信带宽、时延、数据权属压力较大。分布式架构由各主体分别执行本地状态估计，仅向其他主体交换必要的状态变量或聚合结果，响应速度快、数据隐私性好、通信故障适应能力强；但不同主体之间容易出现状态口径不一致，制约跨节点信息共享和全局协调能力。“端－边－云”分层协同在终端侧执行数据采集、状态估计，在场站边缘侧开展局部数据融合、异常识别、安全校核，在云平台侧进行跨区域状态映射、趋势预测、全局可视化，兼顾分布式感知的实时

性、集中式感知的全局性，成为多终端、多节点复杂系统状态感知的重要方向；仍需解决不同层级之间的数据接口、模型同步、状态一致性、网络安全问题。

对于VAMG，车辆、飞行器、补能设施、配电网具有不同的状态变化速度与安全要求，单纯采用集中式或完全分布式架构均存在局限，适合构建以“端–边–云”分层协同为主体、终端分布式自主感知为安全保障的混合架构。在车–机终端层，车辆、低空飞行器实时估计位置、SOC、任务执行状态，涉及电池保护、飞行姿态、返航储备的关键状态应在本地执行判断，避免依赖云端通信。在站端边缘层，以充电站、机巢、垂直起降场为信息汇聚节点，融合终端到达、充电设备占用、换电库存、站端储能、局部气象、变压器负载等信息，形成节点级服务能力与接入裕度。在网端云平台层，进一步接入道路交通、低空航线、禁限飞区、区域气象和配电网运行数据，完成“车–机–站–网”的全局状态映射与协同分析。在通信正常时，由云平台提供全局状态、跨节点协调结果；在通信异常时，终端、边缘节点仍应依靠本地状态维持安全飞行、充电保护、配电网基本运行。

重点围绕车、机状态统一建模，空地多源数据时空对齐，低空节点信息感知标准化，全链路通信互联，状态安全可信传输等方向，构建支撑VAMG运行的透明化感知技术体系，发展面向“车–机–站–网”全链条的状态透明化感知能力。

2. 空地异构终端补能控制技术

面向空地异构终端的补能控制主要解决EV、低空飞行器等不同类型移动终端在补能过程中的功率调节、过程控制、安全保护问题。与传统V2G主要面向EV充放电控制不同，VAMG中的补能对象同时覆盖EV、低空飞行器，将共享变压器、功率模块、泊位、冷却系统，导致电气资源、服务资源的潜在竞争。不同类型终端在电池容量、补能频次、功率等级、接口形式、热管理要求、安全约束等方面也存在显著差异，需要建立面向空地异构终端的差异化补能控制技术体系。目前，在车侧、机侧同步推进相关技术攻关，形成多层级、多范式的控制体系。从控制方法与应用响应看，现有路线主要分为常规反馈控制、模型预测控制、鲁棒–自适应控制三类。

恒流–恒压、比例积分微分等常规反馈方法响应快、实现简单，适用于参数变化较小的设备内环，但难以处理高功率充电中的电–热耦合、无线充电耦合偏移[65]。模型预测控制可在滚动时域内显式处理电流、电压、SOC、温度、功率的爬坡约束，适合eVTOL高功率补能、车机共用设备的过程控制，但依赖准确的电池与热模型，多终端接入时还面临计算实时性问题。鲁棒控制可在电网电压波动、耦合系数变化、模型误差下保证安全边界，但按不利工况设计可能降低补能效率[66]。自适应控制可在线修正电池老化、接口参数、无线耦合变化，但参数收敛性、闭环稳定性、适航验证仍待解决[67]。

VAMG需要建立面向空地异构终端的差异化补能控制技术体系，在接入识别、接口匹配、功率控制、状态监测、安全联锁、故障切断等方面形成统一且适配的技术能力。未来应重点突破多类型终端自动接入与确认控制、充换电过程精细化控制、高功率补能热安全管理、机巢和垂直起降场的自动补能控制、异常工况下的快速保护等关键技术，为车侧资源、机侧补能负荷的安全接入、连续运行、安全补能提供基础支撑。

3. 低空节点接入的交能融合协同规划技术

交能融合规划研究主要围绕EV充电负荷预测、充电设施选址定容、充电站与配电网协同规划等展开，通常采用覆盖选址、流量捕获、混合整数规划等方法，以交通服务需求、配电网承载能力为约束确定站点位置和容量[47]。在电气层面，机巢、垂直起降场属于新增用电负荷。在规划层面，机巢、垂直起降场的负荷规模和空间分布受到飞行任务、航路空域、续航安全、起降周转的共同影响，难以直接套用以道路交通需求为基础的EV充电设施规划方法。

从模型的主导约束角度看，现有的补能设施规划技术大致分为交通需求主导、电网承载力主导、交通–电网联合规划三类。交通需求主导方法侧重服务半径、任务覆盖、运输效率，但对配电网容量约束考虑不足[68]。电网承载力主导方法主要依据节点可接入容量、潮流安全边界来配置负荷，通常将交通用能需求视为外生变量[69]。交通–电网联合规划方法统筹设施选址、容量配置、电网扩建[70]，与VAMG需求较为接近，还需进一步描述UAV分散

高频补能、eVTOL集中高功率补能、车机共享设施形成的异构容量竞争。

面向VAMG，可采取任务－负荷映射、节点选址定容、复合资源配置的递进式规划路线。首先，根据任务频次、航程、载荷、续航储备、起降窗口、气象条件，建立飞行任务关于低空飞行器补能时段、补能功率、接入节点的时空映射模型，分别刻画UAV、eVTOL的负荷特征[34]。其次，在空域可达性、任务覆盖度、地面接驳条件、配电网安全边界约束下，联合确定机巢、起降场的位置和容量，保持低空服务效率、电网接入成本之间的平衡[71]。最后，针对高速服务区、物流园区、综合交通枢纽等复合补能节点，将EV充换电设施、低空补能设施、站端储能和配电网扩容方案纳入统一模型，协调不同终端对场地、功率模块、配变容量的共享与竞争。

该类规划的主要难点在于低空任务数据不足、空域与配电网空间尺度不一致、任务需求和新能源出力具有不确定性、多类型终端服务优先级难以统一表达。未来可采用多阶段混合整数规划、随机或鲁棒优化、分解协调方法，构建包含低空交通需求预测、补能节点规划、配电网扩建决策的协同规划框架，再通过典型场景、实际运行数据验证规划方案的适用性。

4. 多时间尺度VAMG能量流优化调度技术

V2G、综合能源系统调度通常采用日前优化、日内滚动修正、实时控制相结合的技术路线，通过协调EV充放电、分布式电源和储能运行，实现电网“削峰填谷”、需求响应、运行成本优化。相关方法主要包括混合整数规划、随机或鲁棒优化、模型预测控制、分布式优化等[72-76]，现有研究多以车辆到离站时间、SOC为主要约束，难以直接描述低空飞行任务、续航储备、航班周转、空域状态变化对补能需求的动态影响。

VAMG能量流调度并非要求车、机均向电网反向送电，而是在有限配网和场站容量下协调EV充放电、UAV与eVTOL补能、站端储能、分布式电源运行。其中，EV具有相对宽松的停驻时间窗，可提供较大范围的充放电调节；UAV补能功率较小但频次较高，调度重点是任务之间的补能时序和节点选择；eVTOL补能功率集中且受航班计划约束，调度重点是航班之间的补能次序和场站峰值控制[57]。因此，VAMG需要统一描述不同资源在功率、能量、持续时间、空间位置、任务窗口等方面的异构灵活性。

在时间尺度上，日前调度主要根据车辆出行、低空任务、分布式电源出力、电价预测，确定EV充放电计划、机侧补能基准计划、站端储能出力、场站功率边界；日内调度根据新增任务、航班调整、气象和空域变化，对补能次序、功率分配、储能计划进行滚动修正；实时控制依据配变负载、节点电压、设备占用、终端状态，执行充电功率调整、负荷转移、应急优先级控制。相应地，可在日前阶段采用随机或鲁棒优化处理预测不确定性，在日内阶段采用模型预测控制实施滚动决策，在实时阶段采用分层分布式控制或安全规则保证任务与电网运行边界。

该技术需要重点解决VAMG特有的三类问题：飞行任务与补能需求的耦合，机侧可调空间需扣除任务能耗、返航、备降储备，不能仅依据SOC区间确定；车、机异构灵活性的统一度量，需同时刻画功率、能量、空间位置、任务时窗、失约风险；复合补能节点的容量竞争，需协调EV充电、低空飞行器补能、站端储能对配变、功率模块、服务泊位的共同占用，再根据飞行安全、应急任务设置服务优先级。未来还需解决多源不确定性、跨平台信息交互、大规模混合整数模型求解效率等问题，形成日前计划、日内滚动、实时安全控制相衔接的分层协同调度体系。

（二）车－机－网互动商业模式

1. V2G的既有商业模式

从产业化进展看，V2G已围绕EV灵活性资源开发形成了较为清晰的商业模式，可概括为平台化汇聚模式、集中式运营模式、局域自治耦合模式、系统侧直接调用模式。各类商业模式的共同特征在于，以EV可调节能力的组织化释放为核心，依托平台、场站或电网主体开展资源聚合与价值转化。平台化汇聚模式主要通过第三方平台汇聚分散的车辆资源，参与需求响应、辅助服务、电力市场交易，体现出较强的市场化和平台化特征。集中式运营模式依托公交、校车、物流等高度组织化车队，在不影响运营任务的前提下开展集中式充放电管理，具有资源确定性强、调度窗口清晰的优势。局

域自治耦合模式强调将EV嵌入“源网荷储”一体化系统，通过局部能源管理促进光伏消纳、负荷优化、储能协同，具有较强的场景适配性。系统侧直接调用模式由电网企业及所属的能源服务机构直接组织终端资源，重点服务“迎峰度夏”、局部拥塞缓解、事故应急支援等对时效性和可靠性要求较高的场景[77-78]。

V2G的平台聚合、集中运营、区域自治、电网调用模式可为VAMG提供组织基础，但可迁移的是计量、聚合、结算机制，并不是将机侧默认等同为可放电EV。机侧的初期收益主要来自任务服务和用能成本优化，而电力市场收益仅是补充。

2. VAMG互动潜在商业模式

相较V2G主要围绕电能量调节价值进行商业模式设计，VAMG可在EV可调节资源基础上，进一步纳入低空任务型补能负荷、复合补能设施、空间信息服务，价值来源由电能调节拓展至设施共享、用能优化、交通任务、公共服务等方面，商业模式也由单一电力市场参与逐步转向跨行业协同运营。未来，VAMG的价值来源不再局限于参与电网需求侧响应或辅助服务的收益，而是体现为综合补能、运输、保障等多元价值的协同实现。

从基础设施运营角度看，高速服务区、物流园区、产业园区、交通枢纽等将逐步形成集EV充换电、UAV换电、eVTOL补能、站端储能、分布式能源于一体的复合补能节点。运营主体通过统一建设和集中运营，推动土地资源、电网容量、能源设施、运维资源共享，由传统单一充电服务向综合能源服务转型；提高设施利用率以摊薄建设成本，形成以复合型基础设施建设和运营为主要收益来源的商业模式[79]。该模式的实施前提是车、机补能需求在空间上具有一定集聚性，车、机补能设施可共享配变容量、站端储能、土地和运维资源，也需配套统一接网、设施产权协调、成本收益分摊等机制。

从交通运输服务角度看，VAMG有望催生“地面运输+低空服务”一体化服务模式。物流企业、车/机设备厂家、基础设施运营商可联合构建空地协同运输网络、补能网络，由EV承担干线运输和地面接驳，UAV承担末端配送和应急投送，通过统一调度平台开展资源协同配置，依据任务完成效率和服务质量形成新的服务价值与潜在收益来源，构建车、机协同的新型物流模式[80]。该模式的实施需要形成相对稳定的空地联合任务链，车、机任务在时间和空间上具有衔接关系，具备统一任务调度、补能协同、低空运行保障条件，支持任务组织与补能需求的联合协调。

从能源资产运营角度看，未来可能出现跨行业负荷聚合商，统一协调车、机、站、网等资源的运行。与传统V2G运营商仅负责充放电调度不同，VAMG运营商需要同步管理车辆状态、飞行任务、补能需求、场站容量，在充分考虑电价、电网需求侧响应服务价格、运输任务充放电约束的基础上，提供面向车、机能源资产的运营服务；核心环节是通过市场化交易手段、补能环节调控来降低能源购买成本，构建与客户分润的商业模式。该模式的实施需要车、机、站端资源形成一定的聚合规模，具备可观、可测、可调能力及统一的通信、计量、控制接口，同时满足需求响应、虚拟电厂等现有市场机制的接入要求。现阶段机侧主要通过补能柔性参与聚合，仍需与EV、站端储能协同才能形成市场调节能力。

从公共服务角度看，VAMG具有较强的城市韧性保障价值。在重大活动保供、自然灾害、突发事件场景下，通过统一调动车侧移动供能资源、机侧快速感知资源、场站保障资源，可形成集移动供电、灾情感知、通信中继、应急运输于一体的综合保障能力，相应收益来源将由市场化任务收入拓展至公共服务采购。该模式的实施需要建立应急任务分级和资源调用机制，具有备用能源、通信、低空运行保障条件，形成公共服务采购等相对稳定的成本补偿机制，合理覆盖资源长期备用和应急调用成本。

从经济性角度看，不同VAMG商业模式的收益结构、成立条件存在差异。复合补能基础设施模式的经济性主要受初始投资、设施利用率、土地等资源共享程度的影响，共享程度越高则相较独立建设的成本优势越明显。空地协同运输模式的可持续性取决于任务规模、设备利用率、任务衔接效率、运输服务收益等因素。能源资产运营模式主要受可聚合调节能力、电价差、市场补偿水平、资源调用频率、平台运营成本等因素的影响，现阶段参与电力市场收益的不确定性较大，更适合作为综合运营收益的补充。公共服务模式主要受应急任务频率、资源备用成本、公共服务

采购机制的影响。整体来看，不同商业模式下影响VAMG商业可行性的因素众多且差异明显，具体项目的经济性仍需结合区域投资成本、任务需求、市场机制进行深入评估。

六、车－机－网互动产业化发展

（一）面临的挑战

1. 标准体系建设滞后

在状态感知、补能控制、协同调度等关键技术尚待突破之外，跨域标准体系缺失是制约VAMG工程落地的重要因素。车、机、站端设施分属于交通、航空、电力三大产业范畴，既有规范多锚定各自系统的内部安全与设备运维，缺乏面向协同互动场景的统一物理接口、通信协议、测试验证标准。这种标准异构引发单体可用但系统难协同的困境，使局部技术方案难以转化为可复制的工程标准。特别是在涉及机巢、起降场、充换电设施、聚合平台、配电网调度系统的复杂交互中，若缺乏清晰的技术边界和一致性判定规则，项目实施往往需要依赖定制化集成，不仅抬高建设和运维成本，也会削弱后续规模化推广的制度基础。

2. 电网准入机制不明确

VAMG的工程落地，关键在于离散资源被纳入可感知、可计量、可调控的统一管理框架。现阶段，相关设施在接入条件、运行准则、调度权限、责任认定方面缺乏明确且统一的制度安排。机侧任务型补能负荷需要在满足空域管理、续航安全、任务时序约束的前提下，参与有序补能和需求响应。若简单沿用普通可调负荷的管理思路，往往难以准确界定可调边界。由此带来的问题不仅体现在审批环节的不确定性，而且体现在进入运行阶段后将出现可接入但难调度、可调度但难考核、可考核但难追责的情况，也就制约相关场景由示范应用向常态化运行的转变。

3. 配套的市场化机制缺失

从产业演进动力看，VAMG面临的突出问题在于复合价值尚未与现有市场转化路径进行有效衔接。VAMG的价值同时包含有序补能、用能成本优化等能源价值，应急感知、通信中继、空间覆盖、任务保障等非能源价值，而现有机制尚未形成针对不同价值属性的分类核算和收益实现路径，导致能源调节收益、任务服务收益难以协同转化。特别是对使用频率波动较大、响应窗口具有较强场景依赖性的机侧资源而言，若缺少与其特征相匹配的精细化补偿机制，资源拥有者将难以形成稳定的商业预期。

4. 产业整体协同性不足

与传统V2G相比，VAMG涉及的协同链条更长，参与主体更为复杂，涵盖电网企业、平台运营商、起降场业主、UAV运营主体、设备供应商等利益相关者，而各主体之间尚未形成稳定的职责边界和利益协调机制。在实践中，VAMG工程落地往往受到建设主体不明、平台归属不清、收益分配不合理、风险承担不均衡等非技术因素的影响。若缺少基础性的契约安排、协同组织机制，具体项目容易陷入多方参与但统筹不足的碎片化状态。可见，VAMG并不是参与主体的简单叠加，而是要求在组织运行、场景实施层面形成有效衔接。打通跨主体、跨环节、跨场景的协同机制，仍是推动相关模式由单点试验走向系统推广的瓶颈环节。

5. 政策引导性不足

从政策层面看，VAMG不再只是单纯的技术议题或市场议题，而是一个典型的跨部门协同议题。该模式横跨能源配置、配网运行、交通组织、低空飞行、基础设施布局等领域，单一管理部门的政策工具难以覆盖VAMG的完整链条。目前相关政策仍以分领域推进为主，缺少面向复合场景的统筹设计，导致规划衔接、审批协调、数据共享等方面存在明显的制度摩擦。政策安排的碎片化不仅削弱支持措施的实际效能，也会降低市场主体对产业发展路径的稳定预期。对于尚处起步阶段的新业态而言，制度供给的连续性和可预期性往往比一次性的资金支持更重要。

（二）建议措施

鉴于当前低空补能设施规模、可调能力、市场机制仍处于发展初期，VAMG不宜直接按照成熟灵活性资源建立独立准入和市场机制，而是根据资源规模、协同价值、技术成熟度渐进发展。近期，以机巢、起降场等任务驱动型可控负荷的安全接入、有序补能为主。中期，随着复合补能节点规模扩大，重点验证车、机协同补能对“削峰降容”、资源利用率提升等局部配网的价值。远期，在可聚合

调节能力、稳定履约能力、商业收益达到一定水平后，探索独立资源准入、市场补偿、跨部门治理机制。

1. 加快标准体系建设

推进VAMG，首先需解决不同系统之间有效协同的基础性问题。现阶段，车、机、站端设施主要延续各自产业体系独立发展，相关标准也多服务于单一领域内部运行，尚未形成面向协同互动场景的统一框架。为此，后续标准建设应由单体设备规范逐步转向系统协同规范，重点围绕接口定义、通信协议、充换电兼容、调度响应、网络安全、测试认证等环节开展统筹设计。可结合V2G、低空经济的既有试点，分阶段建设共性标准、场景标准、验证标准，为后续跨主体、跨设施的规模化接入筑牢基础。

2. 明确电网准入规则

仅有标准体系仍不足以支撑VAMG的规模化运行，资源进入统一管理框架还依赖明确的准入制度和运行规则。针对当前接网条件、调度权限、责任划分尚不清晰的情况，应尽快建立与资源类型相匹配的分类准入、分层管理机制。对于小型机巢、一般UAV补能设施，按照任务驱动型可控负荷接入配电网，重点明确接入容量、计量监测、有序补能、安全责任要求。对于集中式换电基地、垂直起降场等高功率设施，应单独开展配网承载能力校核。当机侧聚合可调能力达到对局部峰荷或配电设备容量形成可辨识的影响时，可进一步开展资源注册、能力认定、调度试点；在稳定履约并形成持续配网影响后，建立独立的准入、调用、退出机制。

3. 健全市场化机制

VAMG的持续推进离不开与其价值特征相适应的市场化机制。机侧可控补能的能源价值，应急感知、通信保障、空间覆盖、任务保障等非能源价值缺乏分类实现机制，有必要在现有的需求响应、辅助服务、虚拟电厂等机制基础上，建立和完善适用于复合型灵活性资源的市场设计方案。对于车侧资源，可继续依托成熟度较高的峰谷套利、需求响应、辅助服务机制来拓宽收益来源。对于机侧资源，主要通过有序补能、用能成本优化来获得收益。对于聚合负荷，在具备可计量、可控制、稳定履约能力后参与需求响应。应急感知、通信保障、空间覆盖等非能源价值，更适合通过任务服务合同、公共服务采购来获得补偿。

4. 强化产业协同推进

VAMG涉及电网企业、平台运营方、设施建设方、车企、UAV运营主体、场景业主等参与者，推广实施是跨主体协同过程。针对当前产业链协同不足、项目闭环不完整等问题，应注重以典型场景为牵引构建协同推进机制。可依托城市低空物流园区、综合交通枢纽、应急保供场景、复合补能节点协同场景，建立“场景提出–主体协同–平台接入–机制验证–模式复制”实施路径。对于建设运营边界、收益分配关系、风险承担机制等关键问题，在试点过程中同步明确，逐步形成可复制、可推广的组织模式并确保商业闭环。

5. 加大政策引导力度

VAMG的持续发展，需要制度供给、治理能力的同步跟进。鉴于该模式横跨能源、电力、交通、低空运行、基础设施建设、公共安全管理等领域，单一管理部门主导的政策安排都不足以覆盖实施链条。现阶段可将VAMG相关内容纳入低空基础设施、交通能源融合、配电网规划的既有协调机制，优先开展跨部门数据共享和示范项目审批协同。待资源规模进一步扩大、协同价值得到充分验证后，再研究相对独立的VAMG规划与治理机制。

七、结语

本文围绕V2G向VAMG演进这一前瞻性方向，系统梳理了VAMG的内涵与价值、互动潜力、典型场景、关键技术、商业模式、发展路径。VAMG并非传统V2G的简单外延，而是将地面出行、低空任务、补能节点、配电网运行纳入统一框架，涉及任务–能量映射、空域与配网边界耦合、共享设施容量竞争等新问题。车、机侧的电网角色并不对称，EV可在具备双向设备时参与充放电调节，而UAV、eVTOL本体主要表现为任务驱动型柔性负荷，调节方式以补能时序、功率、节点协调为主。在设定的基准情景下，UAV群可调功率将达到与同规模EV群相近的数量级，但受单体电池容量限制而致可转移电量、持续调节能力较弱，现阶段更适合作为局部、短时的可调补能负荷。基于车、机、网耦合关系的形成机制，归纳了共享补能设施、空地联合任务、应急保障三类车、机、网协同的典型场景，提

炼了状态感知、补能控制、协同规划、能量流调度等关键技术。

VAMG处于由概念验证向工程示范过渡的阶段，产业化、规模化发展需要技术、标准、市场、政策协同推进。一方面，应以典型场景为牵引，优先在高速服务区、产业园区、城市低空物流节点、重要负荷保供、灾害应急支撑等场景开展示范验证，逐步形成可复制、可推广的技术方案和运营模式。另一方面，应加快完善跨行业标准体系、电网准入规则、市场化补偿机制、多主体协同治理机制，推动交通、低空、能源、电力系统之间形成更加清晰的接口边界、责任体系、收益分配机制。后续，随着低空补能基础设施、聚合调度平台、新型电力市场机制的不断完善，VAMG有望成为支撑新型电力系统建设、绿色交通转型、低空经济发展的交能融合重要形态，为提升电网灵活性、交通运行效率、城市韧性提供新路径。

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: May 13, 2026; **Revised date:** September 24, 2026

Corresponding author: Zhang Yongjun is a professor from the School of Electrical Power Engineering, South China University of Technology. His major research fields include intelligent distribution network, distribution network optimization and planning. E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Integration and Development Strategy of New Energy and Artificial Intelligence Industries in Guangdong Province” (2025-DFZD-27)

参考文献

[1] 谢克昌. 新型能源体系发展思考与建议[J]. 中国工程科学，2024，26(4)：1-8.
Xie K C. Strategic thinking and suggestions on new energy system[J]. Strategic Study of CAE，2024，26(4)：1-8.

[2] 成润婷，张勇军，李立涅，等. 面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设及研究进展[J]. 中国工程科学，2023，25(2)：89-99.
Cheng R T，Zhang Y J，Li L C，et al. Construction and research progress of electricity market for high-proportion renewable energy consumption[J]. Strategic Study of CAE，2023，25(2)：89-99.

[3] 2025年全国机动车达4.69亿辆 驾驶人达5.59亿人[EB/OL]. (2026-01-26)[2026-09-15]. https://www.gov.cn/lianbo/202601/content_7056115.htm.
By 2025，there will be 469 million motor vehicles nationwide and 559 million drivers[EB/OL]. (2026-01-26)[2026-09-15]. https://www.gov.cn/lianbo/202601/content_7056115.htm.

[4] 徐潇源，李佳琪，王晗，等. 城市电力－交通系统韧性研究综述及展望[J]. 电力系统自动化，2024，48(23)：1-15.
Xu X Y，Li J Q，Wang H，et al. Review and prospect of research on urban power-transportation system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems，2024，48(23)：1-15.

[5] 黄玉萍，张天任，杨维佳，等. 车网互动技术研究进展及规模化应用展望[J]. 中国工程科学，2026，28(3)：328-346.
Huang Y P，Zhang T R，Yang W J，et al. Vehicle-to-grid interaction technology：Research progress and prospects for large-scale application[J]. Strategic Study of CAE，2026，28(3)：328-346.

[6] 范苏纯，黄向敏，张勇军，等. 计及有序充电的配电变压器扩展规划建模[J]. 电力系统自动化，2021，45(7)：62-70.
Fan S C，Huang X M，Zhang Y J，et al. Modeling of expansion planning for distribution transformer considering orderly charging[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(7)：62-70.

[7] 张勇军，林靖淳，林衍扬. 基于交能耦合的电动汽车有序充馈电策略[J]. 浙江电力，2025，44(10)：112-120.
Zhang Y J，Lin J C，Lin Y Y. An orderly charging/discharging strategy for electric vehicles based on power-traffic coupling[J]. Zhejiang Electric Power，2025，44(10)：112-120.

[8] 杨景旭，张勇军. 基于有序充电启动机制和补贴机制的充电负荷接纳能力优化[J]. 电力自动化设备，2020，40(11)：122-129.
Yang J X，Zhang Y J. Optimization of charging load acceptance capacity based on ordered charging start-up mechanism and subsidy mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(11)：122-129.

[9] International Energy Agency. Global EV outlook 2025[R]. Paris：International Energy Agency，2025.

[10] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图3.0[M]. 北京：机械工业出版社，2025.
China Society of Automotive Engineers. Technology roadmap for energy-saving and new energy vehicles 3.0[M]. Beijing：China Machine Press，2025.

[11] 樊邦奎，李云，吴陈，等. 无人机产业高质量发展战略研究[J]. 中国工程科学，2025，27(6)：261-272.
Fan B K，Li Y，Wu C，et al. High-quality development of the unmanned aerial vehicle industry[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(6)：261-272.

[12] 张军，陈磊，高智杰，等. 低空无人机技术研究现状与展望[J]. 中国工程科学，2025，27(2)：73-85.
Zhang J，Chen L，Gao Z J，et al. Low-altitude unmanned aerial vehicle technology：Current status and prospects[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(2)：73-85.

[13] 孙国辉，聂鹏，赵丽彤. 低空经济市场空间预测研究[J]. 信息通信技术与政策，2024，50(11)：33-40.
Sun G H，Nie P，Zhao L T. Research on market space forecast of low-altitude economy[J]. Information and Communications Technology and Policy，2024，50(11)：33-40.

[14] Bibak B，Tekiner-Moğulkoç H. A comprehensive analysis of vehicle to grid (V2G) systems and scholarly literature on the application of such systems[J]. Renewable Energy Focus，2021，36：1-20.

[15] Zhou Q，Jin Y S，Zhang R J，et al. Stability analysis for bidirectional V2G power conversion systems in electric vehicles[J]. Electronics，2026，15(4)：740.

[16] Habib S，Kamran M，Rashid U. Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks—A review[J]. Journal of Power Sources，2015，277：205-214.

[17] 李诚龙，屈文秋，李彦冬，等. 面向eVTOL航空器的城市空中运输交通管理综述[J]. 交通运输工程学报，2020，20(4)：35-54.
Li C L，Qu W Q，Li Y D，et al. Overview of traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2020，20(4)：35-54.

[18] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报，2024，45(5)：529937.
Deng J H. Technical status and development of electric vertical take-off and landing aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2024，45(5)：529937.

[19] 余莎莎，陈星雨. 城市空中交通领域关键技术创新与挑战[J]. 航空学报，2024，45(S1)：730657.
Yu S S，Chen X Y. Key technological innovations and challenges in urban air mobility[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2024，45(S1)：730657.

[20] Brunelli M，Ditta C C，Postorino M N. New infrastructures for urban air mobility systems：A systematic review on vertiport location and capacity[J]. Journal of Air Transport Management，2023，112：102460.

[21] 廖小罕，屈文秋，徐晨晨，等. 城市空中交通及其新型基础设施低空公共航路研究综述[J]. 航空学报，2023，44(24)：028521.
Liao X H，Qu W Q，Xu C C，et al. A review of urban air mobility and its new infrastructure low-altitude public routes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2023，44(24)：028521.

[22] Wang J，Shao Y M，Ge Y M，et al. A survey of vehicle to everything (V2X) testing[J]. Sensors，2019，19(2)：334.

[23] 岳超，钟佳儒，宁启立，等. 新技术形势下“车能路云”融合发展战略研究[J]. 中国工程科学，2024，26(1)：45-58.
Yue C，Zhong J R，Ning Q L，et al. Development strategy of vehicle–energy–road–cloud collaboration in the new technological situation[J]. Strategic Study of CAE，2024，26(1)：45-58.

[24] 左大发，朱德龙，朱娜娜. 低空经济下车辆与无人机协同配送路径优化研究综述[J]. 包装工程，2025，46(19)：298-310.
Zuo D F，Zhu D L，Zhu N N. Review of research on the optimization of collaborative distribution routes between vehicles and UAVs in low-altitude economy[J]. Packaging Engineering，2025，46(19)：298-310.

[25] 何正友，向悦萍，廖凯，等. 能源–交通–信息三网融合发展的需求、形态及关键技术[J]. 电力系统自动化，2021，45(16)：73-86.
He Z Y，Xiang Y P，Liao K，et al. Demand，form and key technologies of integrated development of energy–transport–information networks[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(16)：73-86.

[26] 周原冰，龚乃玮，王皓界，等. 中国电动汽车发展及车网互动对新型储能配置的影响[J]. 中国电力，2024，57(10)：1-11.
Zhou Y B，Gong N W，Wang H J，et al. Study on the influence of electric vehicle development and the vehicle-grid interaction on new energy storage configuration in China[J]. Electric Power，2024，57(10)：1-11.

[27] 廖小罕，徐晨晨，叶虎平. 低空经济发展与低空路网基础设施建设的效益和挑战[J]. 中国科学院院刊，2024，39(11)：1966-1981.
Liao X H，Xu C C，Ye H P. Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2024，39(11)：1966-1981.

[28] 帅石金，马骁，张晓卿，等. 低空飞行器混电动力系统关键技术研究进展与展望[J]. 推进技术，2025，46(11)：37-58.
Shuai S J，Ma X，Zhang X Q，et al. Advances and challenges in hybrid-electric propulsion technologies for low-altitude aerial vehicles[J]. Journal of Propulsion Technology，2025，46(11)：37-58.

[29] International Energy Agency. Global EV outlook 2026[R]. Paris：International Energy Agency，2026.

[30] 李振坤，胡焜，姚一聪. 考虑用户意愿的电动汽车集群可调度容量评估方法[J]. 浙江电力，2026，45(1)：34-47.
Li Z K，Hu K，Yao Y C. A dispatch capacity assessment method for electric vehicle clusters considering user willingness[J]. Zhejiang Electric Power，2026，45(1)：34-47.

[31] Zhang C Z，Qiu Y Q，Chen J W，et al. A comprehensive review of electrochemical hybrid power supply systems and intelligent energy managements for unmanned aerial vehicles in public services[J]. Energy and AI，2022，9：100175.

[32] DJI FlyCart 200 specs[EB/OL]. [2026-09-15]. https://www.dji.com/cn/flycart-200/specs.

[33] Taye A G，Pradeep P，Wei P，et al. Energy demand analysis for eVTOL charging stations in urban air mobility[C]//AIAA Aviation Forum and Ascend 2024，2024：4627.

[34] 胡泽春，邵成成，何方，等. 电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J]. 电力系统自动化，2022，46(12)：3-19.
Hu Z C，Shao C C，He F，et al. Review and prospect of research on facility planning and optimal operation for coupled power and transportation networks[J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(12)：3-19.

[35] Zhan W P，Liao Y，Deng J J，et al. Large-scale empirical study of electric vehicle usage patterns and charging infrastructure needs[J]. npj Sustainable Mobility and Transport，2025，2：9.

[36] Bouček Z，Flídr M. Mission planner for UAV battery replacement [C]//2024 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)，2024：1-6.

[37] 刘嘉彦，李祖坤，李畅，等. 电动汽车与电力–交通耦合网互动：综述与展望[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(5)：12-24.
Liu J Y，Li Z K，Li C，et al. Interaction between electric vehicles and power–transportation coupled networks：Current status，challenges and development trends[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2024，39(5)：12-24.

[38] Seo M，Kodaira D，Jin Y W，et al. Development of an efficient vehicle-to-grid method for massive electric vehicle aggregation[J]. Energy Reports，2024，11：1659-1674.

[39] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2819.
Zhang Z G，Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(8)：2806-2819.

[40] 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.

[41] Dugan J，Mohagheghi S，Kroposki B. Application of mobile energy storage for enhancing power grid resilience：A review[J]. Energies，2021，14（20）：6476.

[42] 肖作鹏，张伟聪，李祎杨，等. 低空无人机配送的空地协同组织特征及挑战——以深圳市为例[J]. 资源科学，2025，47（8）：1663-1674.
Xiao Z P，Zhang W C，Li Y Y，et al. Characteristics and challenges of air–ground coordination for low-altitude drone delivery：A case study of Shenzhen[J]. Resources Science，2025，47（8）：1663-1674.

[43] 江里舟，别朝红，龙涛，等. 能源交通一体化系统发展模式与运行关键技术[J]. 中国电机工程学报，2022，42（4）：1285-1300.
Jiang L Z，Bie Z H，Long T，et al. Development model and key technology of integrated energy and transportation system[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42（4）：1285-1300.

[44] Shirvani M H，Hafezi Y，Esmailifar S M. Energy loss reduction in power distribution systems through intelligent power management of electric UAVs[C]//2024 8th International Conference on Smart Cities，Internet of Things and Applications（SCIoT），2024：55-58.

[45] 王鹤，汪瑶，边竞，等. 基于改进滚动时域法的大规模电动汽车接入电网双层实时调度策略[J]. 电网技术，2025，49（11）：4659-4669.
Wang H，Wang Y，Bian J，et al. A bi-level real-time dispatch strategy for large-scale electric vehicles into smart grid based on an improved rolling horizon method[J]. Power System Technology，2025，49（11）：4659-4669.

[46] 蔡国伟，姜雨晴，黄南天，等. 电力需求响应机制下基于多主体双层博弈的规模化电动汽车充放电优化调度[J]. 中国电机工程学报，2023，43（1）：85-99.
Cai G W，Jiang Y Q，Huang N T，et al. Large-scale electric vehicles charging and discharging optimization scheduling based on multi-agent two-level game under electricity demand response mechanism[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43（1）：85-99.

[47] Li Y L，Wang K，Xu C J，et al. The potentials of vehicle-grid integration on peak shaving of a community considering random behavior of aggregated vehicles[J]. Next Energy，2025，7：100233.

[48] 俞拙非，刘菲，刘瑞环，等. 面向配电网弹性提升的源网荷灵活资源优化研究综述及展望[J]. 中国电力，2022，55（4）：132-144.
Yu Z F，Liu F，Liu R H，et al. Resilience-oriented optimization of source－grid－load flexible resources in distribution systems：Review and prospect[J]. Electric Power，2022，55（4）：132-144.

[49] 武帅，蔡春伟，陈轶，等. 多旋翼无人机无线充电技术研究进展与发展趋势[J]. 电工技术学报，2022，37（3）：555-565.
Wu S，Cai C W，Chen Y，et al. Research progress and development trend of multi-rotor unmanned aerial vehicles wireless charging technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2022，37（3）：555-565.

[50] Solanki B，Sanders P，Miller E，et al. Federal aviation administration vertiport electrical infrastructure study：NREL/TP-5R00-86245[R]. Golden：National Renewable Energy Laboratory，2023.

[51] Wu J M，Cao S Q，Hansen M，et al. Integrating urban air mobility into the power grid through smart charging solutions[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2025，179：105281.

[52] Langenmayr U，Wang W M，Jochem P. Unit commitment of photovoltaic-battery systems：An advanced approach considering uncertainties from load，electric vehicles，and photovoltaic[J]. Applied Energy，2020，280：115972.

[53] 张帅，刘思亮，张文宇. 电动车–无人机协同配送模式下带时间窗的车辆路径优化问题[J]. 中国管理科学，2025，33（4）：131-141.
Zhang S，Liu S L，Zhang W Y. Vehicle routing problems with time windows under the collaborative delivery mode of electric vehicle–drone[J]. Chinese Journal of Management Science，2025，33（4）：131-141.

[54] Amorosi L，Dell'Olmo P，Puerto J，et al. A time-space network model for a truck and multi-drone delivery system with battery recharging and variable speeds[J]. Omega，2026，138：103399.

[55] Justin C Y，Payan A P，Briceno S I，et al. Power optimized battery swap and recharge strategies for electric aircraft operations[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2020，115：102605.

[56] Vehlhaber F，Salazar M. Electric aircraft assignment，routing，and charge scheduling considering the availability of renewable energy[J]. IEEE Control Systems Letters，2023，7：3669-3674.

[57] Wang Y，Xu Y，He J H，et al. Coordinating multiple sources for service restoration to enhance resilience of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2019，10（5）：5781-5793.

[58] Gao Q F，Gu F，Guozhu S，et al. Optimizing hybrid microgrids based battery swapping and charging station for UAV operations in remote areas with considering multiple weather uncertainties[J]. Applied Energy，2026，404：127125.

[59] 朱文东，柴雅曦，刘增稷. 计及无人机通信协同的灾后配电网保供资源优化调度[J]. 广东电力，2026，39（3）：48-60.
Zhu W D，Chai Y X，Liu Z J. Optimal scheduling of guaranteed resources for post-disaster distribution network considering UAV communication coordination[J]. Guangdong Electric Power，2026，39（3）：48-60.

[60] Rottondi C，Malandrino F，Bianco A，et al. Scheduling of emergency tasks for multiservice UAVs in post-disaster scenarios[J]. Computer Networks，2021，184：107644.

[61] Doo J T，Pavel M D，Didey A，et al. NASA electric vertical takeoff and landing（eVTOL）aircraft technology for public services—A white paper[R]. Washington，DC：National Aeronautics and Space Administration，2021.

[62] 李立理，李德智，钟丹婷，等. 基于多源数据融合与用户柔性引导的公共充换电场站需求响应改进机制[J]. 电网技术，2026，50（7）：2730-2743.
Li L L，Li D Z，Zhong D T，et al. An improved flexible demand response mechanism for public charging and battery swapping stations based on multi-source data fusion and flexible user guidance[J]. Power System Technology，2026，50（7）：2730-2743.

[63] 蒲钒，陈志杰，刘杨，等. 数字低空融合运行空中交通管理

技术[J]. 航空学报，2025，46(11)：531331.
Pu F，Chen Z J，Liu Y，et al. Air traffic management technologies for digital low-altitude integrated operations[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2025，46(11)：531331.

[64] Shang Y T，Yu H，Niu S Y，et al. Cyber-physical co-modeling and optimal energy dispatching within Internet of smart charging points for vehicle-to-grid operation[J]. Applied Energy，2021，303：117595.

[65] 蔡春伟，姜龙云，陈轶，等. 基于正交式磁结构及原边功率控制的无人机无线充电系统[J]. 电工技术学报，2021，36(17)：3675-3684.
Cai C W，Jiang L Y，Chen Y，et al. Wireless charging system of unmanned aerial vehicle based on orthogonal magnetic structure and primary power control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2021，36(17)：3675-3684.

[66] Hu Q H，Amini M R，Wiese A，et al. Robust model predictive control for enhanced fast charging on electric vehicles through integrated power and thermal management [C]//2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)，2023：5267-5272.

[67] Jiang L，Li Y，Ma J M，et al. Hybrid charging strategy with adaptive current control of lithium-ion battery for electric vehicles[J]. Renewable Energy，2020，160：1385-1395.

[68] Huang H L，Savkin A V. Deployment of charging stations for drone delivery assisted by public transportation vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2022，23(9)：15043-15054.

[69] Zhao J，Wang J H，Xu Z，et al. Distribution network electric vehicle hosting capacity maximization：A chargeable region optimization model[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2017，32(5)：4119-4130.

[70] Yang W T，Liu W J，Chung C Y，et al. Joint planning of EV fast charging stations and power distribution systems with balanced traffic flow assignment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2021，17(3)：1795-1809.

[71] Rajendran S，Sinha A A，Srinivas S. Capacitated vertiport and charging station location-allocation problem for air taxi operations with battery and fleet dispatching considerations：A case study of New York City[J]. International Journal of Systems Science：Operations & Logistics，2023，10(1)：2252737.

[72] Wu J C，Hu J J，Ai X，et al. Multi-time scale energy management of electric vehicle model-based prosumers by using virtual battery model[J]. Applied Energy，2019，251：113312.

[73] Khaki B，Chu C C，Gadh R. Hierarchical distributed framework for EV charging scheduling using exchange problem[J]. Applied Energy，2019，241：461-471.

[74] Yu Y，Nduka O S，Nazir F U，et al. A three-stage stochastic framework for smart electric vehicle charging[J]. IEEE Access，2023，11：655-666.

[75] Tang W R，Zhang Y J. A model predictive control approach for low-complexity electric vehicle charging scheduling：Optimality and scalability[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2017，32(2)：1050-1063.

[76] Rahman T，Xu Y，Qu Z H. Continuous-domain real-time distributed ADMM algorithm for aggregator scheduling and voltage stability in distribution network[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering，2022，19(1)：60-69.

[77] 上海开展全国首次大规模车网互动全链路集中测试已具备2万千瓦放电能力[EB/OL]. (2025-04-02)[2026-09-15]. https://www.shanghai.gov.cn/nw4411/20250402/3a241c42c9984048ab3e49965ed5752b.html.
Shanghai launches China's first large-scale full-link centralized test of vehicle-to-grid interaction with a discharge capacity of 20，000 kW available[EB/OL]. (2025-04-02)[2026-09-15]. https://www.shanghai.gov.cn/nw4411/20250402/3a241c42c9984048ab3e49965ed5752b.html.

[78] 湖南电网首批台区V2G项目试点落地[EB/OL]. (2026-03-09)[2026-09-15]. https://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/zwdt/202603/t20260309_33928897.html.
Hunan power grid's first regional V2G project pilot launched[EB/OL]. (2026-03-09)[2026-09-15]. https://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/zwdt/202603/t20260309_33928897.html.

[79] Guo Z K，Li B Z，Taylor G，et al. Infrastructure planning for airport microgrid integrated with electric aircraft and parking lot electric vehicles[J]. eTransportation，2023，17：100257.

[80] Mara S T W，Sarker R，Essam D，et al. Solving electric vehicle–drone routing problem using memetic algorithm[J]. Swarm and Evolutionary Computation，2023，79：101295.