

交通+电力协同规划：解锁车网融合灵活性效益

高驰

睿博能源智库

伴随着电动汽车保有量的迅速增加，电动汽车充电正在成为电力需求的新增长点之一¹。仅2024年上半年，全国电动汽车总充电量就已超243亿千瓦时，同比增长54.6%，且这一指标已连续三年超过50%²。如果这些充电需求没有依照电力系统的供需情况合理安排，轻则将给电网带来巨大升级成本，重则影响电网安全。

在过去十余年中，为了配合电动汽车行业的快速增长，国家积极出台政策鼓励建设配套充电基础设施，并扫清了充电站接入电网的障碍³。然而，在加快推进交通电气化的过程中，这种电网公司对充电基础设施接网“有求必应”的策略，将变得愈发昂贵。为了满足不断增长的充电负荷需求，电力部门发电侧和输配电侧在做相应调整。为了配合未来充电尖峰容量的增长，电力规划还将考虑新建煤电、气电；为了配合充电站顺利接入电网，配电侧也需要对变电站及配电设备进行扩容。如若不加以引导，满足充电需求“野蛮生长”的成本将是巨大的。

鉴于我国电动汽车的增长率和保有量在世界上都处于领先地位，电动汽车接入电网的挑战也更加显著。近两年来，为了应对快速增长的充电需求，我国提出了“车网融合”模式，并指出电网规划

¹ 感谢睿博能源智库的何泉、Max Dupuy、以及段婧琳对本文提出的关键建议；张树伟博士对本文的启发；以及Julia Hildermeier博士对文章大纲的提点。

² 王璐. (2024). 《上半年电动汽车充电量增54.6% 超充等多种技术被看好》. http://www.iicb.cn/2024-07/20/c_1310782176.htm

³ 如国家发改委等几部委发布的《电动汽车充电基础设施发展指南（2015-2020年）》指出电网企业为支持充电基础设施，要做到“设施建设，电网先行”，并且“电网企业要为充电基础设施配套电网建设与改造... 开辟绿色通道”。

是推动车网融合的关键步骤之一。《国家发展改革委等部门关于加强新能源汽车与电网融合互动的实施意见》（发改能源〔2023〕1721号）明确提出要“加强车网互动顶层设计，坚持系统观念，从社会整体效益的高度进行统筹谋划”。《国家发展改革委 国家能源局关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》（发改能源〔2024〕187号）进一步细化了相关措施，从支持配电网高质量发展的角度，强调要“统筹制订电网规划”，并“做好与新能源、电动汽车、储能等产业发展规划的联动”。

一旦车网融合潜力被充分激活，电动汽车不仅能够缓解充电需求增长对电网带来的压力，还能成为电力系统的重要灵活性响应资源。车网融合具体体现在电动汽车的智能有序充电和双向充电两方面。如果电动汽车的充电行为能够配合电力的供需状况并与输配电网的存量及未来规划相结合，就能释放其潜在的灵活性，从而减少对新增昂贵的迎峰和调峰资源的需求，配合新能源发电，减少配电网侧的新投资，降低系统总成本。

基于上述政策文件，本文提出了“车网协同规划”这一概念。通常交通和电力主管部门往往独立规划，若要为车网融合打下坚实基础，两部门需要从数据整合、方法商议、利益相关方参与等多个角度共同发力，实现真正的协同规划。在当下这个电力和交通行业技术变革加速期中，车网融合作为能源和交通两个领域的交汇点，任何一个部门单独承担此项工作都将面临资源和能力的不足。因此，当务之急是通过政策文件来统合规划框架，整合两部门的行业经验、信息和规划方法，并从细致、务实的车网协同规划入手，为车网融合画好蓝图。

车网协同规划的执行目标可以细分为两点。从近期规划的角度来说，车网协同规划可以理性处理新增的充电需求，也就是不将无序充电或优化不当的充电曲线当作电力系统需要满足的硬指标去进行发电及输配电投资规划。相反，在进行电力规划时应首先考虑经合理疏导后电动汽车充电行为的灵活性，并且根据电网需要，通过扎实、基于实证的分析来推算合理优化后的有序充电行为，将优化后的充电曲线叠加其他负荷来相应安排电力投资计划。从中长期规划的角度来考虑，鉴于中国各省的现货市场及辅助服务市场逐渐成型，且需求响应及虚拟电厂的经验不断积累，不妨抱持前瞻的视角，将有序充电及车网互动看作电力系统的重要资源，依此进行中长期电力规划。

本文将首先简要总结车网融合四个益处，并在接下来介绍车网协同规划对于车网融合的重要指导作用，随后将详细列举车网协同规划的具体步骤。在此将着重选取一些在国际领域内有关车网协同规划正逐渐形成的共识，详解如何进行协同规划将最有利于实现车网融合。

车网融合的益处

车网融合的两个方面，智能有序充电是指通过智能技术和控制系统，根据电网的实时负荷、用户需求 and 电价信号等因素，动态调整电动汽车的充电时间和充电速率，以优化能源利用和提高电网运行效率的充电方式；而双向充放电则在此基础上更进一步，允许电动汽车不仅从电网获取电能，还能将其电池中的电能反馈给电网。通过双向充放电，电动汽车可以在电网需求高峰时段释

放电能，提供备用电源，增强电网的灵活性和稳定性，同时在电网负荷较低时段进行充电，提升整体能源利用效率。

车网融合可以给电力系统带来多重助益。最突出的几个作用包括：减少传统调峰资源新增投资需要、配合可再生能源发电并促进对清洁能源的投资，减少配电侧非必要投资，以及降低系统总成本。具体介绍如下：

1. 减少传统调峰资源新增投资需要

伴随着电气化和新能源转型的继续深化，净负荷（总负荷减新能源发电量）曲线的峰谷差将继续拉大，且高峰出现的时段相较传统电力系统而言也会更加分散⁴。也因此，对系统调峰及灵活资源的需求将不断加大。中国当前使用最广泛的调峰资源仍是火力发电厂，而火力发电中又以煤电为主⁵。由于煤电站的工程设计限制，其灵活性改造的固定投入仍然较高，约为600-700元/千瓦，且无法实现短时间内的快速调节⁶。相比之下，尽管电动汽车和其他需求侧资源可能无法完全满足电网的所有调峰需求，但其固定成本投入（包括前期平台建设及设备更换等）大概仅有200-400元/千瓦，且其灵活性更加精准、调节速度相较煤电更快，可以提供调频和快速调峰的服务。此外，由于其建设成本主要集中在数字平台、智能控制系统以及用户激励上，实际成本相对较低。一旦这些资源被充分利用，它们可以作为边际资源，为电网注入显著的灵活性和调峰能力。

2. 配合可再生能源发电并促进清洁能源投资

通过车网融合，电动汽车可以在可再生能源发电高峰时段充电，更精准地重塑负荷曲线，最大化利用可再生能源电力，促进其消纳⁷。此外，电动汽车作为需求侧资源，与分布式光伏发电天然契合，用户在利用光伏自发自用后，余电上网对电网的冲击也会有所减少，增强电网的消纳能力。长此以往，能够减少对化石燃料的依赖，推动能源结构的绿色转型。

3. 减少配电侧非必要投资

鉴于大部分电动汽车充电站都会接入配电网，无序充电对配电侧的冲击最为显著。如配电变压器和配电线路在无序充电的情况下可能会面临过载风险，从而影响电力供应的安全性。如果电网规划按照无序充电对配电网产生的负荷压力进行扩容，设备使用率将显著下降，导致大量不必要的投资。一项研究表明，如果未来美国加利福尼亚州不采用智能有序充电技术，为满足交通和供热

⁴ Olson, A., Cutter, E., Bertrand, L., Venugopal, V., Spencer, S., Walter, K. & Gold-Parker, A. (2023). "Rate Design for the Energy Transition: Getting the Most out of Flexible Loads on a Changing Grid". <https://www.esig.energy/rate-design-for-the-energy-transition-getting-the-most-out-of-flexible-load-on-a-changing-grid/>

⁵ 杨彪等. (2023). 《新型电力系统下的煤电调峰定位》. <https://news.bjx.com.cn/html/20230801/1322684.shtml>

⁶ 袁家海等. (2022). 《电力系统灵活性提升：技术路径、经济性与政策建议》
<http://www.nrdc.cn/information/informationinfo?id=307&cook=2>

⁷ Anwar, M., Muratori, M., Jadun, P., Hale, E., Bush, B., Denholm, P., Ma, O. & Podkaminer, K. (2022). "Assessing the value of electric vehicle managed charging: a review of methodologies and results". <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/ee/d1ee02206g>

的电气化需求，到2035年前需要新增500亿美元用于配电网设备的升级和扩容⁸。此研究强调，通过采用智能有序充电技术，可以有效减轻配电网压力，优化设备使用效率，从而节约大量基础设施投资成本。

4. 降低系统总成本

综上所述，电动汽车充电负荷的增加本身并不是负担，但无序充电会对电网构成压力。通过车网融合，电动汽车可以作为电力系统的需求侧灵活性资源，成为新型电力系统的重要组成部分，不仅能在发电成本更低的时段（例如可再生能源高发时段）充电，还能够优化存量配电容量的使用，在维持系统可靠性的同时降低了系统总成本⁹。车网融合不仅优化了电网调度，还广泛惠及电动汽车用户。用户可以享受更低的电价和更高效的充电服务，显著提升整体用户体验¹⁰。车网融合带来的成本效益被用户广泛分享，将促使更多用户参与其中，形成正反馈，进一步加快车网融合的推广和应用。

车网协同规划的重要性

车网融合的益处虽然显著，但各国距离大规模推行车网融合并实现上述益处尚有一定距离。要推动车网融合，在实施层面需要从激励机制、设备更新、电价设计等多方面入手。然而，在此之前，一个至关重要的基石是**通过车网协同规划，量化交通电气化可以给电网带来的灵活性价值，并将其作为灵活性资源纳入电力系统规划中**。唯有如此，才能正视电动汽车带来的灵活性，真正将其作为电力系统中不可或缺的资源。

车网协同规划不是指各部门独立工作然后简单地互相传递预测结果，而是将交通部门和电力部门的数据采集、规划方法以及双方的需求紧密结合，在国家、省、市各个层级进行统筹规划。协同规划的方法、数据以及假设都需要经过两个部门的共同协商和审批——唯有这种程度的协同合作，才能够对车网融合起到促进意义。

若要将电动汽车作为灵活性资源纳入电力系统规划，首先需要对电动汽车能够提供的灵活性能力及其边界有细致的把控。而这种灵活性能力的量化，唯有通过电力和交通部门双方的紧密合作才能实现。要大规模推广车网融合，首先需要根据交通部门提供的电动汽车充电模式、发展前景以及用户出行模式等信息，来估测电动汽车在全年各个时段所能够提供的灵活性。同时，还需结合电力部门对配电网和发电容量限制的了解。两者相辅相成，才能真正激发车网融合活力。

⁸ Kevala. (2023). "Electrification Impacts Study Part 1: Bottom-Up Load Forecasting and System-Level Electrification Impacts Cost Estimates". <https://www.kevala.com/resources/electrification-impacts-study-part-1>

⁹ Szinai, J. Sheppard, C., Abhyankar, N. & Gopal, A. (2023). "Reduced grid operating costs and renewable energy curtailment with electric vehicle charge management". <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142151930638X>

¹⁰ Burger, J., Hildermeier, J., Jahn, A. & Rosenow, J.. (2022). "The time is now: smart charging of electric vehicles". <https://www.raponline.org/knowledge-center/time-is-now-smart-charging-electric-vehicles/>

车网协同规划的具体步骤

许多研究机构、学术机构、电网企业、以及发电企业对本节中所描述的某个方面或许已有深入的独立研究。本节的主要目的并不是就某一环进行深入探讨，而是将这些独立、分散的点串联起来，提供一个较为完整的框架以供参考。

1. 利益相关方参与和协调

在车网协同规划中，利益相关方的参与与协调至关重要。建立一个由多方代表组成的利益相关方工作小组，全流程参与车网协同规划，从决策、建议和数据分享等方面共同出力，是确保规划成功的关键¹¹。这个工作小组应包括电网公司、政策制定者、汽车制造商、充电站运营商、第三方聚合商、商用车队运营商和电动汽车用户代表等。

车网协同规划的一个重要目标是聚合各机构的数据和专业能力，调动各方的积极性，确保规划的科学性和前瞻性。在多利益相关方的共同努力下，通过及时更新最前沿的预测方法和数据，可以更准确地掌握电动汽车对电网的需求和潜在的灵活性。这种信息和专业能力的整合尤为重要，因为它们来源于非传统的利益相关方，如电动汽车制造商、充电桩运营商和第三方聚合商等。这些外部信息和专业能力的引入，能够弥补监管部门自身在数据和技术上的不足，推动车网融合的全面发展。

利益相关方	可提供的关键信息
汽车制造商	匿名车载远程信息数据、电动汽车预测设备参数（如百公里电耗、电池在不同温度下的实际容量等）
充电站运营商	现有充电桩地理分布、充电桩使用率、充电桩使用时间、未来充电桩计划安装地点
电网公司	配电网阻塞情况、系统尖峰时段、电网扩容计划
电动汽车第三方聚合商	聚合后电动汽车作为系统资源的灵活性和响应能力的具体参数（如爬坡速率、最小响应时间等）
商用车队运营商	商用车队的特殊充电空间时间上的需求
电动汽车用户代表/联盟	私家车出行习惯及充电习惯

¹¹ Energy Systems Integration Group. (2023). "Charging Ahead: Grid Planning for Vehicle Electrification". <https://www.esig.energy/grid-planning-for-vehicle-electrification/>

2. 电动汽车灵活充电能力测算

电动汽车灵活充电能力测算是指结合上述利益相关方所提供的信息以及电力系统的需求，对未来电动汽车的增长趋势、车辆参数以及充电行为可塑性进行合理推测，并在此基础之上测算电动汽车充电负荷的灵活性及其边界。这一规划的难点在于面对未来不确定的电动汽车增长趋势和技术革新，如何尽可能精确地从时间和空间两个维度预测未来的灵活充电负荷。

为了做到最准确的预测，以下三点国际经验可供借鉴：

- 灵活充电负荷预测需要**按照电动汽车的不同终端用途进行分类讨论和汇总**。不同用途的电动汽车，其使用模式、充电特征、甚至车辆设备参数，都有很大差别。例如，物流车和商务车跨城市充电的占比高达**52%**，而私家车占**27%**，出租车仅为**17%**¹²。这种分类讨论有助于细化预测，确保各类电动汽车的充电需求和灵活性都被充分考虑到。
- 在电动汽车灵活充电负荷预测中，**采用高精度的地理和时间数据分析**至关重要。通过细致的地理和时间数据分析，能够更准确地识别各地充电负荷的高峰时段和高峰区域，确保电动汽车充电需求与配电网承载能力的有效匹配。此外，电动汽车的充电习惯会根据季节、工作日、以及节假日发生变化，例如夏季和冬季的充电需求可能会有所不同，这也需要在预测中予以考虑¹³。目前电动汽车数据的收集流程早已标准化¹⁴，且数据的时间、空间精度也足够支持此类分析。然而，目前的大部分规划都尚未有效利用这些数据¹⁵。
- **评估不同价格激励机制对电动汽车充电弹性的影响**。在当前政策环境下，塑造用户充电行为的主要工具仍是分时电价。不同价差对充电行为的塑造能力将直接决定有序充电的效果。例如，对圣地亚哥电力与天然气公司分时电价的研究表明，当峰谷电价比为**2:1**时，近**70%**的电动汽车用户会选择在夜间低谷时段充电，而电价比为**6:1**时，则有**90%**的用户会选择在低谷时段充电¹⁶。虽然这一结果无法照搬，不过类似的充电灵活性弹性分析十分重要。等其他激励手段（例如直控充电，时变尖峰电价等）的试点实行后，也可以依此类推，实证分析不同激励手段对充电行为的塑造能力。我们未来的文章会就这一点进行进一步的讨论。

3. 电网规划

在电网规划这一步中，电力部门可以在充分考虑上述电动汽车灵活充电能力的测算结果后，进一步对电力系统投资进行规划。

美国加州公共事业委员会提出的“资源采购顺序(Loading Order)”可供国内参考。这一顺序规定了在加州的综合资源规划(Integrated Resource Planning)中，为补足资源缺口所进行的资源采购

¹² 中国电动汽车充电基础设施促进联盟. (2023). “2022中国电动汽车用户充电行为白皮书”.

¹³ Energy Systems Integration Group, (2023).

¹⁴ 电动汽车实时数据收集的推荐性收集标准, GB/T 32960-2016, 早在2016年就已执行。规定收集的数据详见 <https://openstd.samr.gov.cn/bzqk/gb/newGbInfo?hcno=674DE45C0AD3DE2CD75B9C4CD8ED57C1>

¹⁵ 如吕梁市电动汽车充（换）电基础设施建设“十四五”专项规划和吕梁市电动汽车充（换）电基础设施建设三年行动计划（2023—2025年）主要通过比值法进行充电基础设施规划。见http://www.lvliang.gov.cn/lxxqk/zfxqk/xxqkml/bgtwj/202402/t20240220_1843319.html

¹⁶ NRDC. (2016). “电动汽车在上海市电力系统中的应用潜力研究”. <http://www.nrdc.cn/information/informationinfo?id=63&cook=2>

需要首先采购能效、需求侧资源，其次可再生能源，而最后才能够采购传统化石能源¹⁷。依照这一思路，在开展电力规划，决定未来电力资源投资时，应首先考虑如何实现电动汽车灵活充电的可塑性，并在此之上再规划新增电网和发电侧投资。目前的一些电力投资决策仅将一年中的尖峰负荷和已建容量进行比较，并由此判断是否应该新建发电设施。这一规划思路将负荷视为毫无弹性，必须要尽数满足的“硬需求”；然而，根据中国有序用电、需求侧管理以及分时电价的经验，我们从实践中了解电力需求的很大一部分是可以灵活调控的。

电网规划可以同时完善发电侧及输配电侧的规划方式。在发电侧，将电动汽车灵活充电纳入电网规划中可以有效减少新增迎峰资源的建设；在输配电侧，可以减少变电站以及其他输配电相关设施的扩容。例如，在纽约市的一个项目中，当地的供电公司，Consolidated Edison Company，利用能效、需求响应等手段成功延后了12亿美元的变电站扩容，为社会带来了近1亿美元的总福利¹⁸。当然，发电和输配电侧扩容在能源转型和电气化逐渐深化的过程中也是有一定必要的，但这些新的升级和建设不应将新增需求当作“硬指标”来完成，而是应当首先发掘需求侧的灵活性，再有针对性地进行必要的升级。

4. 常态化更新相关数据和规划方法

电动汽车技术日新月异，与之相关的数据在不断变化，同时预测和分析的研究方法也在持续精进。因此，有必要定期检查这些假设、方法和关键数据，并将其面向社会公开。这种常规化的检查和公开透明对于车网协同规划尤为重要，因为形成准确、前沿的预测分析需要与多个非传统利益相关方合作。这些利益相关方，包括汽车制造商、充电桩运营商、第三方数据聚合商等，他们的数据和专业知识对于确保预测方法的精确性至关重要。只有通过他们的积极参与和共同努力，才能不断优化和完善预测分析，确保车网协同规划的科学性和准确性。

政策推荐

由于车网融合目前处于新兴阶段，在协同规划的过程中整合各部门及利益相关方的前沿信息和方法也就变得格外重要。关于实施车网协同规划可有以下几点建议供参考：

1. 加强多方统筹协调。如前文所述，仅仅靠单一政府部门很难推动该工作，因此可以考虑设置一个横跨交通、能源等多部门的联合办公室，打破数据、方法、以及协调上的壁垒。例如美国在2021年建立了能源和交通联合办公室（Joint Office of Energy and

¹⁷ CPUC. (2012). “Decision Approving Modified Bundled Procurement Plans, Section 5”.
https://docs.cpuc.ca.gov/PUBLISHED/AGENDA_DECISION/155719.htm#P118_27070

¹⁸ Girouard, C. (2019). “BQDM Program Demonstrates Benefits of Non-traditional Utility Investments”.
<https://www.utilitydive.com/news/bqdm-program-demonstrates-benefits-of-non-traditional-utility-investments/550110/>

Transportation)，成为了美国能源部和交通部之间沟通、合作的桥梁，主管电动汽车的相关政策及信息分享¹⁹。

2. 进一步研究、细化、出台测算电动汽车灵活能力的相关规定或标准。电动汽车灵活性测算在车网协同规划中是难度最大，技术性最强的一部分工作。为了在尊重各地差异的同时简化、标准化这一部分的工作，可以通过颁布测算电动汽车灵活能力的标准来建立统一的框架。该标准需要同时考虑车辆终端用途，高精度的时间及地理信息，以及不同价值激励的效果等多种因素，最大程度地确保灵活能力测算的精确度。
3. 将电动汽车灵活充电等需求侧资源纳入电力规划内。在灵活能力得到精确的测算后，各地进行电力投资规划时，就应率先考虑电动汽车及其他灵活需求的可塑性及其削减负荷高峰的能力，并在此之上再进行传统资源的容量扩建。在《配电网高质量发展行动实施方案（2024—2027年）》相关要求的基础上进一步引导电网公司在进行配电网扩容前应先考虑电动汽车负荷的可塑性，提出基于激发电动汽车充电灵活性的替代方案。

近日颁布的《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027年）》中提出了要“实现典型地区需求侧响应能力达到最大用电负荷的5%或以上，着力推动具备条件的典型地区需求侧响应能力达到最大用电负荷的10%左右。”伴随着电动汽车保有量的不断增长，电动汽车灵活充电在需求侧资源中占的比重也将越来越大。有关部门可以积极将电动汽车有序充电项目纳入“需求侧灵活调节资源库”，并归入“需求侧响应能力”中。随着电动汽车保有量的增长，5-10%的目标也可以适度进一步提高。

¹⁹ U.S. Department of Energy. (2021). *Joint office of energy and transportation. Alternative Fuels Data Center.*
<https://afdc.energy.gov/laws/12746>



Regulatory Assistance Project (RAP)[®]

Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504

No.19 Jianguomenwai Dajie

Beijing, 100004

中国北京市建国门外大街 19 号

国际大厦 2504 室

100004

+86 10 8526 2241

china@raponline.org

raponline.org