为实现最优 V1G 和车网互动部署，对欧洲充电基础设施与能源系统进行协同规划

Francesco Sanvito[1], Francesco Lombardi[1], 和 Stefan Pfenninger-Lee[1]

[1]代尔夫特理工大学技术、政策与管理学院（TPM），荷兰代尔夫特*通讯作者：f.sanvito@tudelft.nl

2026年1月30日

摘要

欧洲目前的车辆充电基础设施目标依赖统一基准，忽略了未来智能充电（V1G）和车网互动（V2G）可能提供的灵活性。为弥补这一不足，我们在以成本最小化为目标的欧洲能源系统模型中明确表示充电基础设施及其成本，使无序充电、V1G 和 V2G 能够相互竞争。我们发现，V1G 可实现大部分系统成本节约（每年 190亿至420亿€年$^{-1}$；2.2%至4.5%），并大幅降低基础设施需求；而 V2G 带来的成本节约较为有限，最高可达每年25亿亿 € 年$^{-1}$，但可创造可观的平衡市场收益（每年64亿€年$^{-1}$）。V2G在光伏主导系统以及电网扩建受限、太阳能和风能发电合计不足的情景下，部署最具成本效益。各国的充电需求各不相同，反映出各自侧重于提高利用率或最大化灵活性。这表明，统一的欧盟目标可能会高估某些地区的基础设施需求，同时限制其他地区智能充电的效益。

18192021

引言

应对气候变化需要迅速向低排放能源系统转型。欧洲政策，包括REPowerEU（欧盟委员会，2022年）和可再生能源指令（欧盟委员会，2021年a），强化了欧洲大陆到2050年（欧盟委员会，2019、2021年b）实现深度脱碳的承诺。在这一更广泛的转型中，交通运输部门仍是一项关键挑战，其排放量占欧盟总排放量的四分之一以上（欧洲环境署，2022年）。仅乘用车就占这些排放量的43%（欧盟委员会，2024年；欧盟委员会，2023）。

交通电气化的不断推进（欧盟统计局——欧盟委员会，2025年）带来了两项关键挑战。首先，若要使气候目标仍可实现，低碳解决方案的部署应当加快（Zeyen等人，2025年）。其次，电动汽车（电动汽车）需求的增长应当加以协调，以避免不必要的能源系统成本（国际能源署，2021年；Mangipinto等人，2022年；Muratori，2018年；Helgeson和Peter，2020；国际能源署，2025年），并释放额外的系统灵活性，从而可能减轻对电力电网的压力（Crozier等人，2020；Needell等人，2023；Gunkel等人，2020；Graabak等人，2016年）。

灵活性选项主要指：(i) 可控充电（V1G），通过转移需求使其与系统条件和可再生能源发电相匹配，尤其是午间太阳能（Wang等人, 2025；Powell等人, 2022）；以及 (ii) 双向充电（车辆到电网），使电动汽车能够向电网反向输送电力，但与单向充电相比，需要更高的投资。V1G和车辆到电网均有望减少对其他储能技术的依赖，并降低总能源

系统成本（Victoria 等人，2019；Zeyen 等人，2025年；Kalweit 等人，2025年；Bogdanov 和 Breyer，2024年；Syla 等人，2025年）。

以往关于V1G和车辆到电网的研究报告的能源系统成本节约幅度差异很大，从零到20%不等（Zeyen 等人, 2025；Kalweit 等人, 2025；Bogdanov 和 Breyer, 2024；Victoria 等人, 2019；Syla 等人, 2025；Brown 等人, 2018b），且经常依赖对V2G市场价值的外生假设（ENTSO-E 和 ENTSOG, 2024；Syla 等人, 2025, 2024），或将基础设施成本与报酬费用混为一谈（Gunkel 等人，2020；Bogdanov 和 Breyer, 2024），从而限制了对潜在经济效益的评估。许多模型还忽略了将基础设施投资作为一项独立决策（Bogdanov 和 Breyer, 2024；Zeyen 等人, 2025；Kalweit 等人, 2025；Gu´eret 等人, 2024；Verzijlbergh 等人, 2014），因此无法恰当评估V1G与车辆到电网之间的竞争。此外，为避免高估灵活性，研究通常会采用对充电功率和可用电池容量的限制性假设（Victoria 等人, 2019；Syla 等人, 2024；Kalweit 等人, 2025；Gunkel 等人, 2020；Zeyen 等人, 2025；Brown 等人, 2018a；Parajeles Herrera 等人, 2026；Muessel 等人, 2023；Miorelli 等人, 2025；Wulff 等人, 2020；Hanemann 等人, 2017）。综上，这些局限意味着，目前尚无系统评估能够确定V1G或车辆到电网是否能持续带来系统层面的效益，也无法确定这些灵活性选项在何种能源系统特征下最为有效。

V1G 和 V2G 的推广可能会影响欧盟《替代燃料基础设施条例》（AFIR）目前规定的充电需求（欧盟委员会，2025年）。引入投资成本往往会促使提高负荷率并尽量减少部署，而利用较低的电力成本进行充电则可能增加基础设施需求。此外，AFIR 未充分考虑不同的能源系统配置，也未考虑电动汽车车队的长期演变（Bernard等人，2022a）。因此，政策制定者适时重新审视相关目标，以避免容量利用不足、错失机遇，并给能源转型带来额外负担。

本文评估了2050年V1G和V2G充电基础设施的成本最优建设规模、相关的系统层面效益、乘用电动汽车的充电需求，以及各欧洲国家潜在的V2G市场收益。此外，我们还确定了在不同电网扩建情景下可能促进车网互动部署的能源系统条件。为此，我们扩展了现有的 Sector-Coupled Euro-Calliope 能源系统优化模型（Pickering 等人，2022；Tr¨ondle 等人，2019），并采用原创的交通基础设施建模方法；据我们所知，这是首次将此类方法引入能源系统规划文献。具体而言，我们将充电和车辆投资决策内生化，同时考虑成本及各国特有的电动汽车电池约束；这些约束通过对 RAMP-mobility 模型（Mangipinto 等人，2022）进行定制化改造获得。借助 1 小时的时间分辨率，我们捕捉了每日和季节性的灵活性模式，同时将每个欧洲国家表示为一个独立节点。

V1G 可显著降低高峰充电需求

我们从三个维度设定情景：充电灵活性水平（无序充电、V1G、车辆到电网）、跨境输电容量（有限、适度和不受约束的电网扩建，依据 ENTSO-E 2040 年预测（ENTSO-E，2018年）），以及充电基础设施成本（高成本、基准成本、低成本和零成本）。充电灵活性通过无序充电、V1G 和车辆到电网来体现，使模型能够优化其部署。每种模式均采用 RAMP-mobility 模型生成的国家特定插枪时间序列（Sanvito，2025年），并根据电动汽车的电池荷电状态纳入不同的插枪概率函数。除纯电动汽车外，模型还允许采用其他动力总成，包括燃料电池电动汽车（FCEV）以及使用柴油或合成柴油衍生物的内燃机汽车（ICEV）。

图1总结了基准成本结果。与无序充电相比，V1G通过将充电方式从

无协调的插电行为转变为价格响应调度，大幅降低了峰值充电需求，从281–284 GW降至73–94 GW。在无控制情景下，电动汽车充电灵活性有限，因此模型通过燃料电池电动汽车满足5%的乘客出行需求，因为氢气生产可以在时间上进行调整。

引入车辆到电网会使充电基础设施的部署量略微增加至 76–116 GW，因为需要额外充电，以便在之后的高电价时段放电。只有部分充电网络升级为具备 V2G 能力，这表明全面双向部署并不具备成本效益。额外的输电扩建会减少对 V2G 基础设施的需求，但无法完全消除这种需求（图1i）。

在所有成本非零的情景中，年度车辆到电网注入量为 1 至 89 TWh；为支持双向运行，额外充电量最高可达 14%（补充图1）。较大的 V2G 电量会对车辆接入时间提出更高要求，因为驾驶员必须兼顾额外充电和放电，除非快速充电得到广泛应用。对此，我们在补充说明1中研究了荷电状态在小时和日尺度上的变化。

总体而言，基础设施成本越高或输电扩建规模越大，V2G 电量就越低，其中基础设施成本的影响更大。

V1G驱动了大部分系统成本降低，车辆到电网仅带来有限节省，但具有可观的市场价值

V1G使能源系统总成本降低2.2–4.5%（19.4–42.4十亿欧元/年$^{-1}$）（补充图2），不含车辆购置成本，并涵盖所有成本情景。当充电基础设施成本较高且输电网扩建受限时，节省最多。车辆到电网仅提供边际的额外系统效益，范围为零至2.5十亿欧元/年$^{-1}$（图2b、d、f）。

从电动汽车车主的角度来看，总充电成本包括基础设施支出、电力购买，以及来自市场套利的V2G收益。支出与收入系利用模型的对偶变量作为批发电价的代理进行估算（Brown等人，2025年），不包括各国特定税费、充电点运营商的利润和人工成本。从无序充电转向智能充电可使电力成本降低24-44%。相反，从V1G转向车辆到电网会使电力成本增加1-17%，但这些额外成本在很大程度上被V2G市场收入所抵消，其范围为0.2至6.4十亿欧元/年$^{-1}$。因此，平均充电价格从无控制情景下的84-111欧元/兆瓦时$^{-1}$（与既往研究一致，Lanz等人，2022 45 59 $^{-1}$ 1 41 59 $^{-1}$ 2 ）下降至V G情景下的-欧元/兆瓦时以及V G情景下的-欧元/兆瓦时。

在国家层面，与 V1G情景相比，电动汽车车主通过车辆到电网可节省的充电总成本最高可达66%——光伏资源丰富的国家表现更佳（图 2g）。车辆到电网的普及程度提高，会增加向电网注入的总电量，但会降低单位能源的报酬，这反映了供给驱动的价格效应。尽管电动汽车必须保持连接更长时间，才能获得相当的收入，但车辆到电网的总电量增加或许能让更多用户参与，从而带来收益稀释，而非参与者相互挤占。

统一的充电基础设施目标忽视了各国对 V1G 和车辆到电网充电的具体需——求

欧盟《替代燃料基础设施条例》（AFIR）为每辆电动汽车设定了 1.3 kW 的公共充电容量统一目标，不考虑国家级能源系统特征，也不考虑采用 V1G 或车辆到电网充电的情况，或电动汽车普及率。要评估这类统一目标是否合理，需要了解充电基础设施需求与各国及不同充电场景下实际利用率之间的关系。

因此，我们将充电基础设施需求（以每辆车的平均充电功率表示）与充电基础设施负荷率进行比较。这两个量在数学上

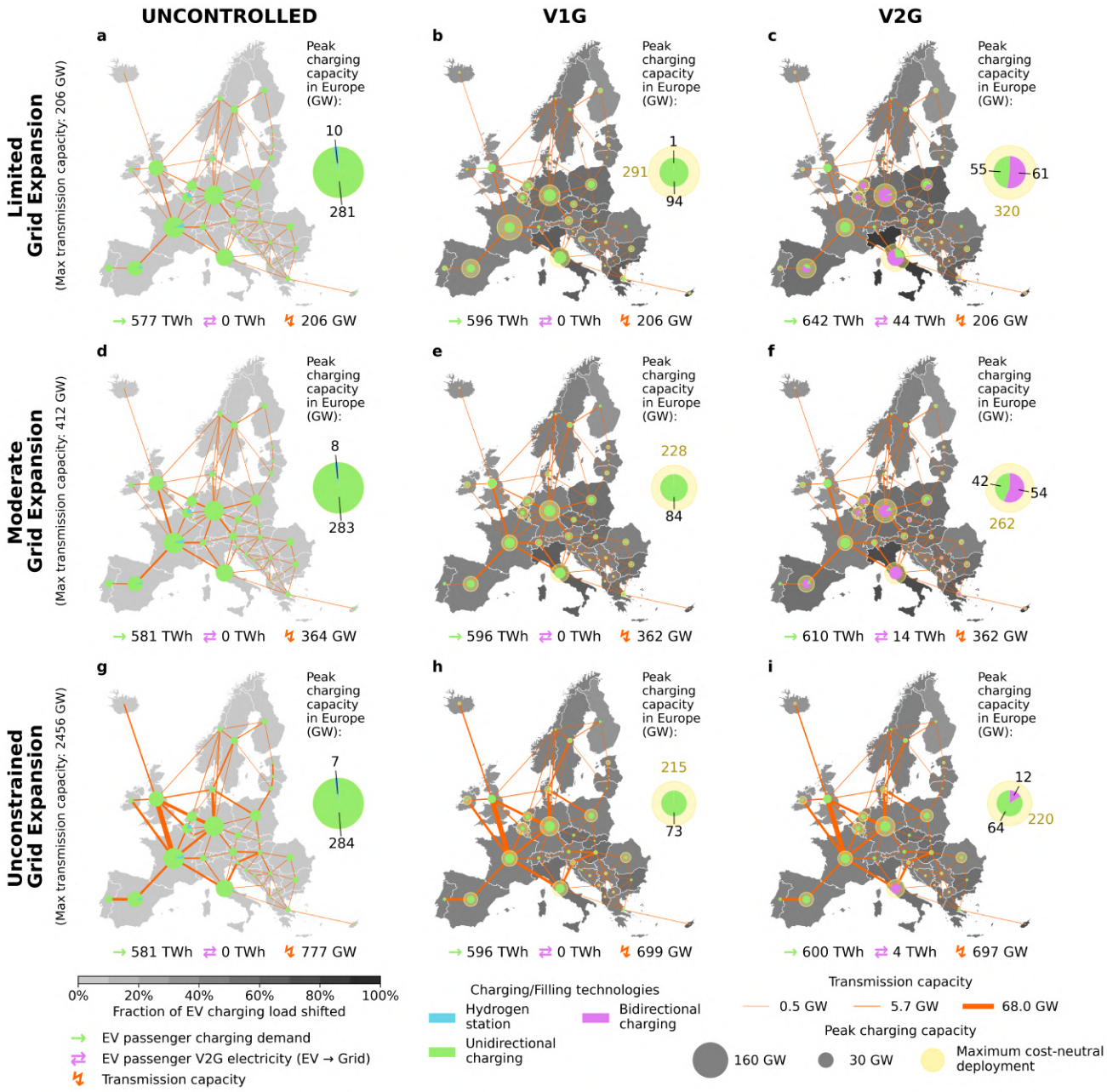


图1：成本基准情景下的充电基础设施部署。每个国家的圆形标记大小代表已安装充电容量，扇形的颜色则表示充电或加注基础设施的类型，区分加氢站、单向充电和双向充电。黄色圆形标记表示最大成本中性部署，其计算方法是将目标情景与相应无控制情景之间的能源系统总成本差额（即系统效益）除以充电基础设施成本。由此得出的数值代表在不增加系统总成本的情况下可部署的额外基础设施容量。图中还显示了输电线路，线宽表示输电容量。每个面板还列出了其他指标，包括总充电需求、仅针对乘用电动汽车计算的V2G电力注入总量，以及输电容量总量。结果仅涉及为乘用车部署的充电基础设施。

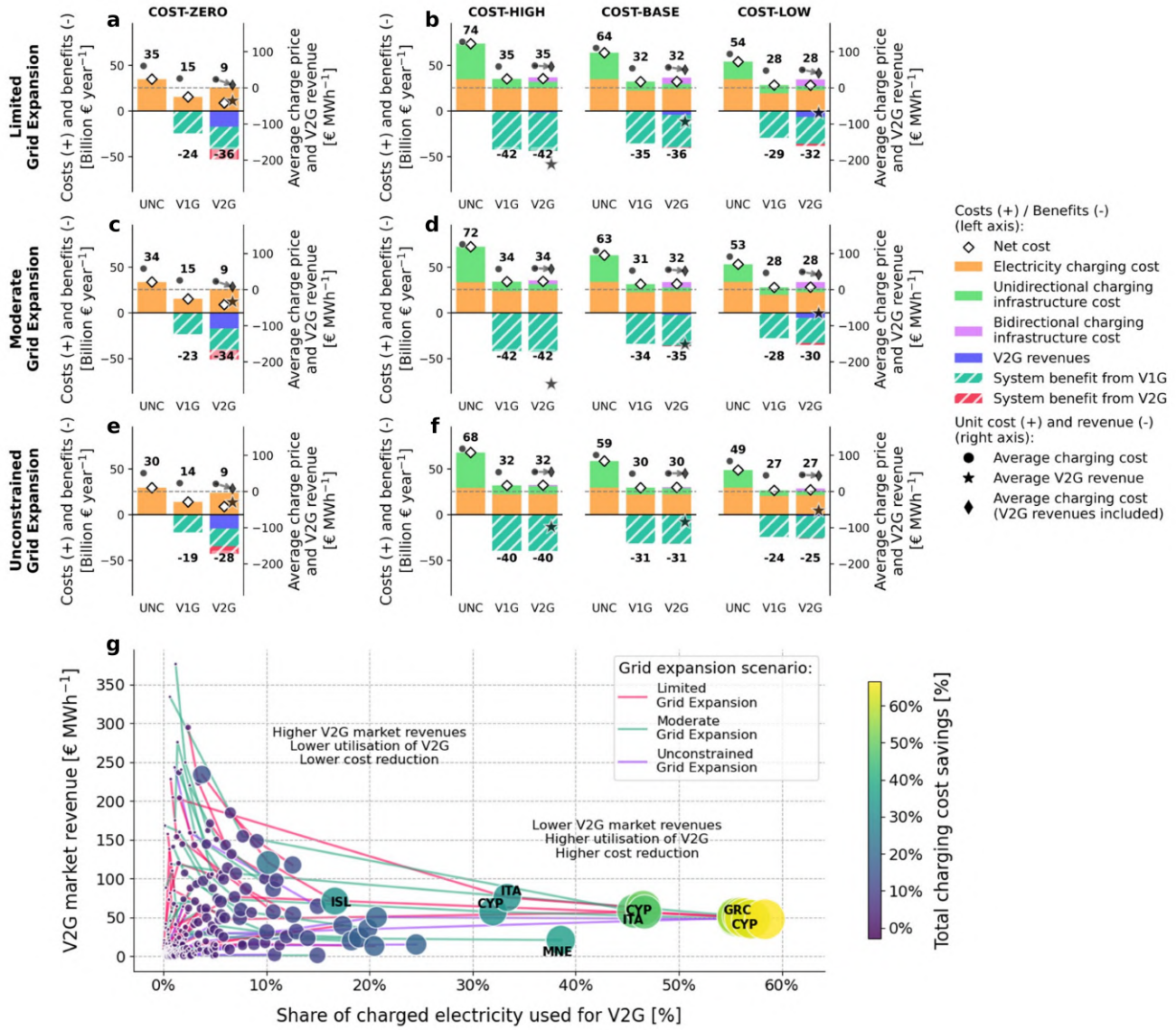


图 2：总充电成本与系统整体效益。从 (a) 到 (f) 的各面板展示了每种情景下成本最优的总充电成本，该情景由三个维度构成：电网扩建水平、充电基础设施灵活性水平以及充电基础设施成本估算。总充电成本（净成本）包括基础设施成本、购电总支出和 V2G 收益。相对于 V1G 和 V2G 激活的系统整体效益总额（以斜线填充表示）以负值表示（收入也同样如此）。各情景柱附近标示了总成本和系统整体效益总额。每个面板均标示了计入和未计入 V2G 市场报酬影响时的充电总单位成本。面板 (g) 展示了各建模国家的 V2G 情景相较于 V1G 的总充电成本节省占比，以及所有非零充电基础设施成本情景下的这一占比。

共同关联并刻画充电基础设施的部署情况。图3中，每个国家135均以一条曲线表示，描绘利用率水平的变化关系；曲线形状136由电动汽车平均能耗、行驶距离以及车辆到电网情景下相对于出行需求的137放电量决定。更多方法细节见方法138部分。139

在出行需求相同的情况下，单向充电的这一关系不受140充电时间分布影响，因此无序充电和V1G情景的曲线完全相同141（图3a–b、d–e和g–h中的浅灰色线）。启用车辆到电网后，放电量也计入142负荷因子计算，使曲线上移，并减弱利用率与所需容量之间的143反向关系（图3c、f和i）。总体而言，较高的充电容量144与较低的平均利用率相关，但能提高运行灵活性。145

虽然这些曲线描述了利用率与容量的可行组合，但结果表明，146在成本最优配置中，基础设施利用率高于无序充电147情形，从而降低充电总装机容量，并使能源系统成本保持在较低水平。148这类结果可能意味着充电设施部署在空间上较为集中。为考虑这一趋势，149我们利用沿各条曲线识别出的下限和上限，定义充电基础设施部署的150可行范围。151

下限对应于成本最优能源系统方案，在该方案中，V1G 和152车辆到电网通过尽可能少地部署充电基础设施，实现系统效益最大化。上153限则定义为智能充电仍能相较无序充电带来净154系统成本降低的最大部署水平。超过这一水平，系统效益便会消失；155因此，我们将这一上限称为最大成本中性部署。这两个156界限划定了与智能充电带来的非负157系统效益相兼容的充电基础设施部署范围。158

图3展示了成本基准情景下的结果。在启用 V1G 和车辆到电网时，15各国充电需求差异很大，范围从每辆车 0.17 到 2.81 kW^{-1}，两种充电策略之间的差异16微乎其微。这种显著差异表明，充电16基础设施目标高度取决于国家能源系统特征，因此单一欧盟统一基准的16适用性面临挑战。16

例如，比利时通过从无序充电转向 V1G 获益显著，164因为灵活性弥补了较高的基础设施成本。相比之下，英国和挪威等国家的165充电需求低于每辆车 0.5 kW^{-1}，这反映出其能源166系统以风能和水电为主，负荷转移带来的经济价值有限。167从绝对量来看，乘用电动汽车的充电基础设施总配置量在 V1G 情景下达到 215–291168 GW，在 V2G 情景下达到 220–320 GW，具体取决于电网扩建情景（图1）。169超过这些水平后，进一步部署带来的成本将超过智能充电的收益，并增加170能源系统总成本。171

最佳车网互动部署取决于能源结构中的光伏普及率17结构17

最佳车网互动部署主要受充电基础设施成本、电网扩建以及174电力结构的影响。当充电基础设施成本高昂且有输电175容量可用时，车网互动馈电仍然有限。在高成本和基准成本情景下，176在受限和适度电网扩建情景中，馈电量最高为 6 太瓦时；177而在不受限电网扩建情景中，约为 24 太瓦时。降低充电基178础设施成本有助于推动更多车网互动部署，使电网注入量达到 89 太瓦时。当179充电基础设施成本变得低廉，而电网扩建仍受限制时，发电180结构便成为车网互动推广的首要决定因素。在这种情况下，太阳能普及率181

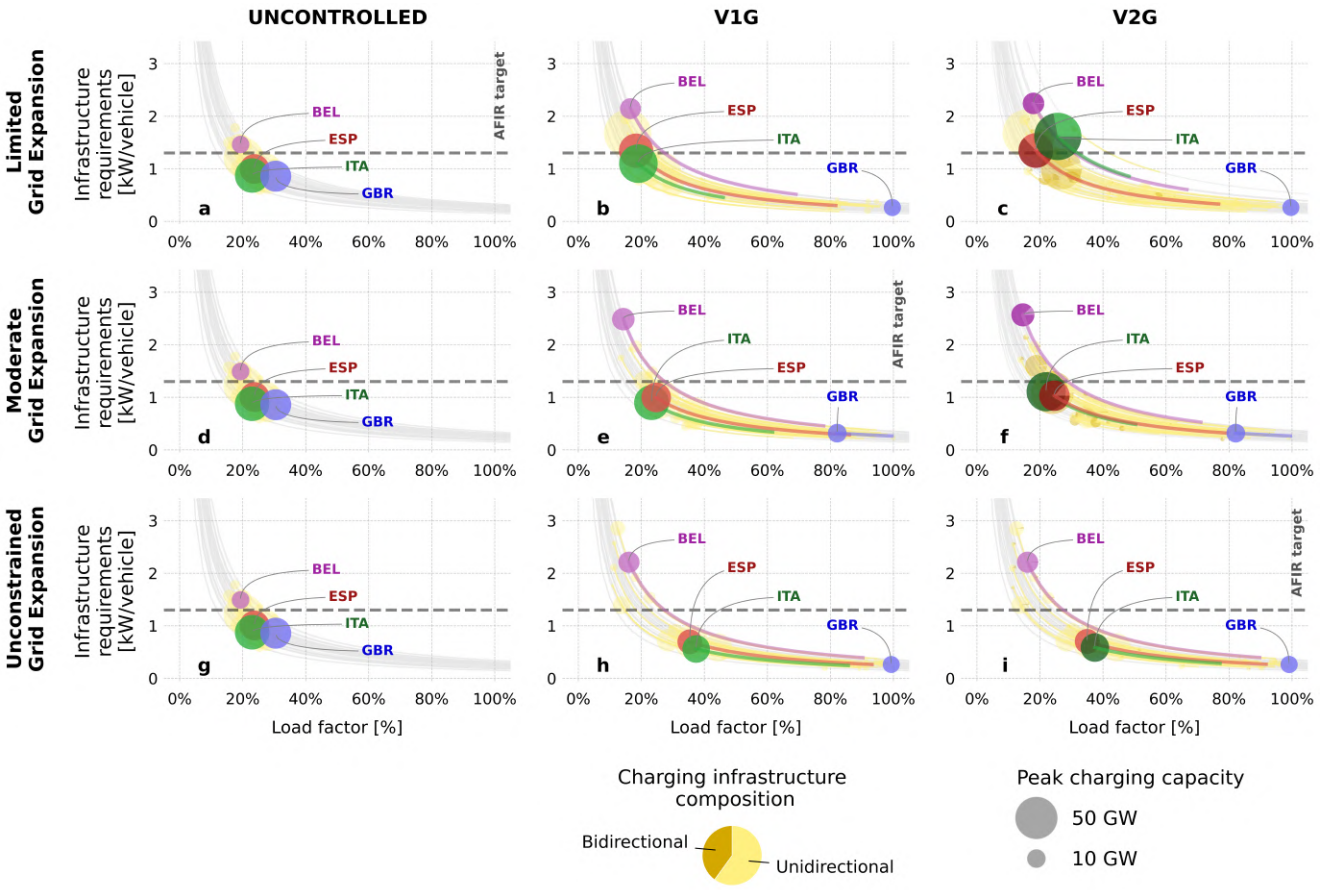


图3：充电基础设施需求与负荷率之间的关系。每个圆圈代表一个国家，其大小表示峰值充电容量水平，颜色表示充电基础设施容量的类型占比。黄色的附加圆圈表示充电基础设施扩建的理论最大水平；在该水平下，基础设施利用率最低，且相较于无序充电情景，能源系统成本节约至少为正值。特定电动汽车充电能耗和行驶距离水平相同的国家位于同一条灰色曲线上，其充电需求系数也相同（见方法）。虚线表示《替代燃料基础设施法规》（AFIR）设定的每辆电动汽车1.3 kW基础设施需求目标（欧盟委员会，2025年）。

成为大规模部署的先决条件，因为较大的日内价差为分布式储能创造了有利可图的套利机会。V2G的竞争力还取决于V1G与V2G之间的边际成本差异，相对于替代储能或可调度技术而言，包括成本较低或已发生沉没投资的选项，例如抽水蓄能或大型水坝。

随着基础设施成本持续下降，V2G运行与光伏部署会相互促进。在成本基准情景中，光伏部署的变化范围为 −5%至 +7%，而在低成本情景中，这些影响完全转为正向，范围为0至 +10%，同时风电渗透率下降（补充图16）。在模型中，输电电网扩建始终比单独激活V2G更能促进光伏部署。

我们通过一项针对性的“生成替代方案建模”（MGA）分析，评估车网互动与光伏关系的稳健性（Lombardi等，2025年），该分析应用于成本基准和低成本情形下的适度电网扩建情景。当在成本放宽5%的边际范围内最大化车网互动部署时，净注入量仅略有增加，发电结构基本保持不变，这表明系统对额外车网互动灵活性的需求很小。相反，在相同的成本放宽范围内最小化光伏容量时，车网互动馈电量在成本基准情形下从12太瓦时降至7太瓦时，在低成本情形下则从79太瓦时降至1太瓦时。通过常规敏感性分析将光伏成本降低50%，进一步证实了这种依赖关系：成本基准情景下，V2G活动从12太瓦时增至99太瓦时；而在低成本情景下，V2G活动从79 307 2太瓦时增至太瓦时。这种不对称性表明，V2G会响应太阳能发电创造的机会，而更广泛的系统对V2G可用性的变化则表现出有限的敏感性。敏感性分析结果详见补充说明2。

智能充电还通过取代固定式电池，在降低系统成本方面发挥着核心作用储能。在成本基准情景中，采用无序充电且输电受限时，储能需求高达 874 GWh；但同时启用电网扩建和智能充电后，储能需求降至零。即使不增加输电容量，智能充电在减少储能需求方面的效果也优于单独扩建电网；我们的分析基于分层有符号 Shapley 加权（补充说明3）证实了这一点，而车辆到电网虽贡献较小，仍具有重要意义。输电扩建主要降低了对可调度热电联产和联合循环燃气轮机的依赖，这些机组使用生物质衍生燃料或电制燃料。车辆到电网运行还能使可再生能源发电与灵活电力负荷相匹配，使热泵部署量增加约 1% 至5%。

当太阳能与风能的合计发电量不足且输电扩建受限时，车辆到电网可提供灵活性

现在，我们展示各建模国家车辆到电网的季节性利用模式和日内运行情况（图5）。所选指标分别为季节性模式下的每日最大车网互动发电占比，以及日内运行下的车网互动平均利用率。

呈现出三种季节性使用模式。电网扩展水平降低后，V2G利用率在全年更加稳定。这种情况出现在能源结构以光伏为主的国家，例如意大利、希腊和塞浦路斯。夏季，电动汽车充放电取代了光伏发电盈余的外送。

第二种模式是，V2G使用量仅在冬季增加，此时可变可再生能源发电率的综合值最低。在这种情况下，车辆到电网技术充当调峰资源，尽管装机容量相当可观，每年实际放电的时间却只有几个小时。这种情况既出现在太阳能和风能资源均衡且输电受限的地区，也出现在电网扩建限制减弱时的太阳能主导地区。在第一种情况下，灵活电解槽吸收夏季盈余；在第二种情况下，空间平衡

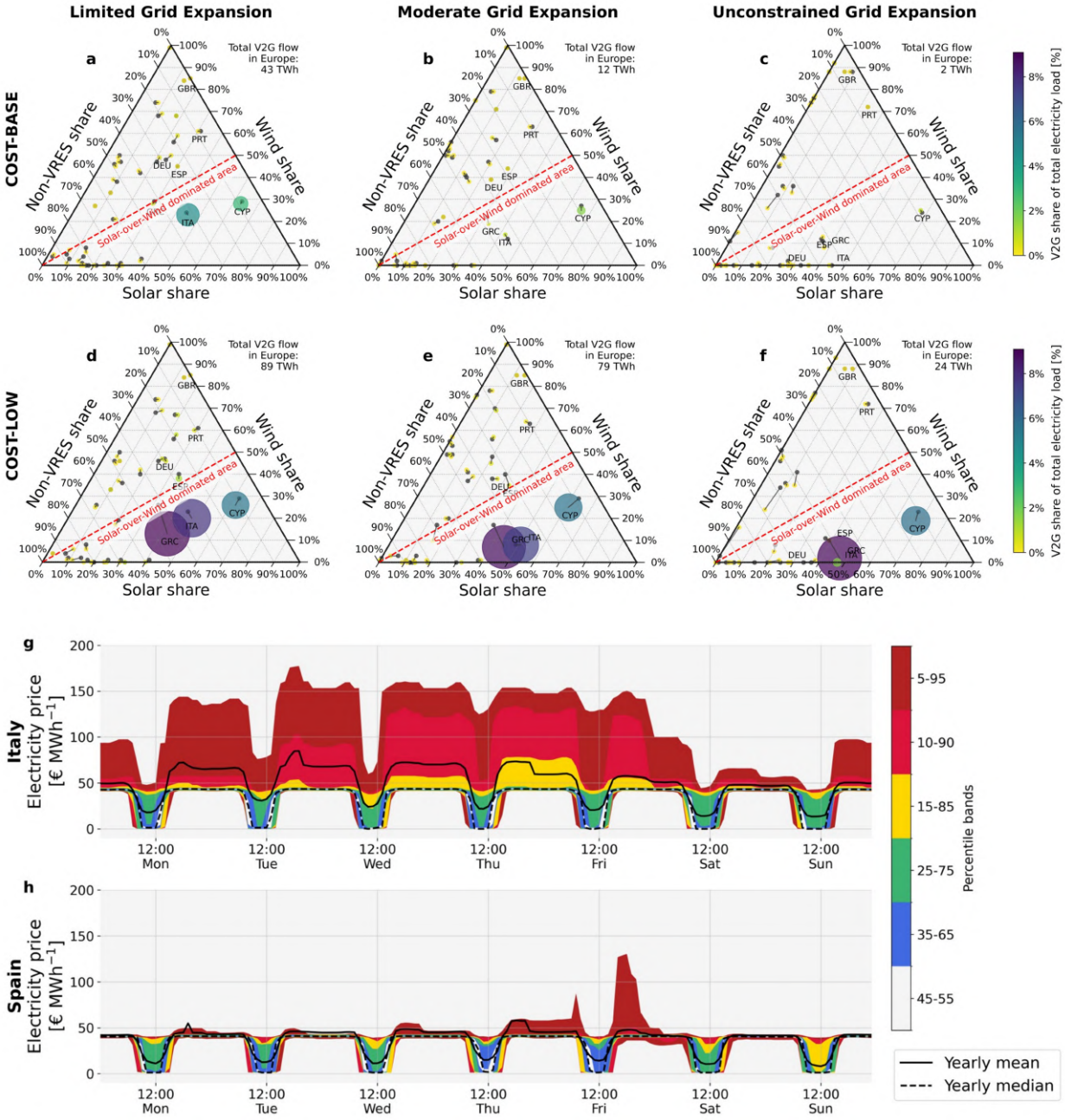


图 4：车网互动采用模式与能源系统结构之间的相关性。(a)-(f) 面板展示了三元图，每个圆形标记代表一个国家。灰色圆形标记代表 V1G 情景，彩色圆形标记代表车辆到电网，各国对应的圆形标记彼此相连。圆形标记的大小和颜色均表示车网互动馈电占各国总发电量的比例。红色虚线标示出太阳能占比大于或等于风能占比（相对于总发电量）的区域。(g)-(h) 面板展示了意大利和西班牙在低成本和适度电网扩建情景下一年内的电价差，按七天为一个单位报告。意大利的光伏渗透率达到 50%，而西班牙的风能占比（35%）高于光伏占比（33%）。这一差异使意大利的日均最高电价差达到 47 € MWh^{-1}，西班牙则为 38 € MWh^{-1}。这会影响车辆到电网的馈电量：意大利达到 56 太瓦时，而西班牙为 2 太瓦时。此外，西班牙拥有更多廉价、可调度的水力发电厂容量，有助于缓解电价波动。电价差和可用的灵活性选项能够解释车网互动采用模式。

通过电网传输，可减少对车辆到电网运行的依赖（补充图17）。

第三种模式出现在其他灵活性资源相比车辆到电网更具竞争力时。在这些情况下，双向充电的采用极为有限，甚至完全没有，因为抽水蓄能或水库水电与可用时的电网电力输入与输出相结合，能够确保该国的能源系统平衡。

总体而言，充电基础设施成本会影响这些模式。高成本或基准成本会使V2G调度集中在高峰电价时段，并维持较高的负荷率；而较低成本的基础设施则促进更分散、更稳定的使用。在本研究中，当充电基础设施成本设为零时，车辆到电网的使用比冬季更集中于夏季月份。这表明，充电基础设施成本会显著影响双向充电的调度，尤其是在季节性方面。

虽然季节性V2G运行是间歇性的，但每小时的运行遵循系统性模式。电动汽车会在太阳能发电峰值出现前后立即被要求放电，以缓和早晨爬坡，并帮助管理负荷转移后仍然存在的晚间峰值。

讨论

我们的研究评估了到2050年，在欧洲行业耦合的能源系统中优化部署V1G和车辆到电网的影响。通过明确表示充电基础设施及其成本，对V1G和车辆到电网部署水平进行内生优化。

在各种情景下，车辆到电网基础设施均得到持续部署，在不同跨境输电限制和基础设施成本条件下，占总量的11–56%。注入电量每年介于0至89太瓦时之间，仅占电力部门平衡的一小部分，与TYNDP24估计的55–80太瓦时大体一致（ENTSO-E和ENTSO-G，2024年）。车辆到电网利用率在较便宜的可调度技术无法使用、电价出现较大日内价差时被触发。排除基础设施成本的反事实分析表明，忽略这些成本会导致车辆到电网利用率不切实际地偏高，进而高估该技术的潜在收入（补充说明4）。

在我们的研究中，V1G每年可降低系统成本194亿至424亿欧元（2.2%至4.5%，不包括车辆成本），而V2G每年最多可降低25亿欧元。V2G每年还可创造最高达64亿欧元的总收入。我们的成本节约潜力规模与此前的研究结果一致（Kern和Kigle，2022年；Kalweit 等人，2025年），但我们的结果凸显了V1G的重要作用，体现了充分利用充电基础设施的重要性。V1G实现了大部分系统整体效益，而V2G仅在特定系统配置下带来额外价值。在电网扩建有限且基础设施成本较低时，光伏主导系统更适合采用V2G。光伏部署量会随着基础设施负荷率最大化而减少。在电网扩建且基础设施成本较低时，部署动态相互促进，这与此前的研究结果一致（Kern和Kigle，2022年；Powell等人，2022年；Gu´eret 等人，2024年）。我们的定向多目标遗传算法（MGA）和敏感性分析进一步证实，V2G的价值有限且取决于系统条件。

此前的研究（Kalweit 等人，2025年；Syla 等人，2025年）报告了以夏季或冬季为主导的车辆到电网模式。通常，每项研究只呈现一种模式，因为基础设施成本往往未被纳入，或分析聚焦于特定的国家系统。我们的结果表明，两种模式均可能出现，这取决于光伏可用性、季节性短缺，或成本更低的可调度资源是否可用，从而协调了此前相互分歧的研究结论。这一点至关重要，因为我们表明，车辆到电网能够帮助缓解冬季缺口问题，并平衡夏季月份的过剩可再生能源产量，从而减轻电网连接的压力。

本研究未评估 V1G 或车辆到电网在配电网层级的性能，因此未明确纳入网络约束，而这些约束可能揭示出额外的益处。通过纳入内生的

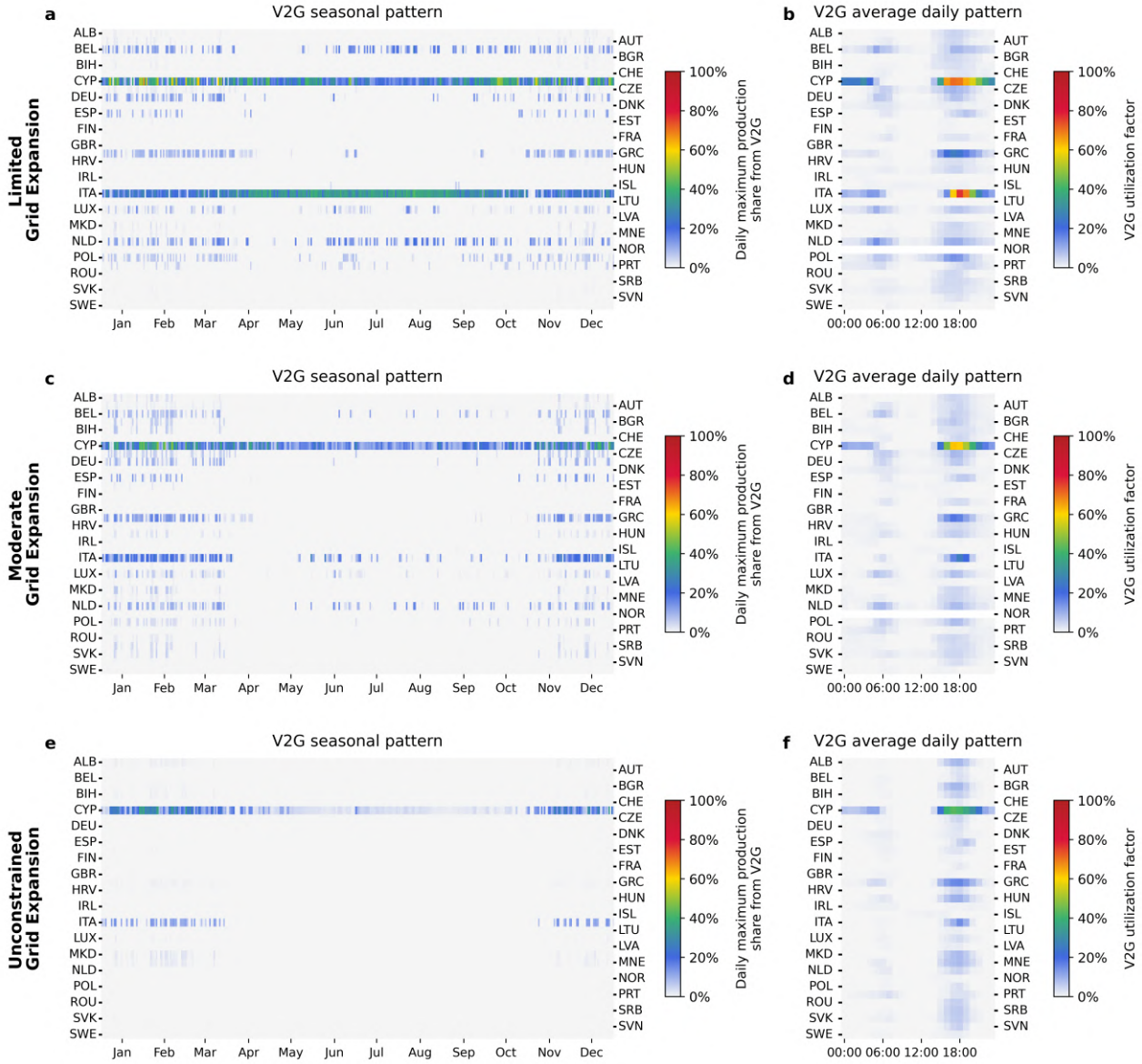


图5：车辆到电网的季节和日利用模式。(a)、(c)、(d)图展示了车辆到电网对总发电量贡献的日最大占比。车辆到电网主要在冬季时段使用，此时太阳能和风能发电总量较低，电价差由这种稀缺性驱动。(b)、(d)、(f)图展示了全年平均车网互动利用系数，显示各国的时间模式较为一致：傍晚的馈电量较高，早晨在光伏发电提升之前也有馈电，但程度较轻。结果对应基准成本情景。

对于充电基础设施成本，模型通过负荷系数部分反映了利用率限制[276]优化。V2G收益的计算假设可完全参与平衡市场，但未[277]考虑潜在损耗或参与其他市场的情况。模型未考虑充电位置，因[278]为重点是量化与能源系统一致的下限和上限，而非[279]局部电网影响。局限性将在补充说明5中进一步讨论。[280]

我们的空间分辨模型结果引发了对欧盟统一充电[281]基础设施目标的质疑。替代燃料基础设施条例规定的每辆车1.3千瓦基准忽视了系统价值、国家级[282]能源系统差异以及电动汽车普及率的影响。尽管较高的早期目标可能有助于促[283]进普及，但随着电动汽车普及率和利用率提高，相关要求会下降（Bernard等人，[284]2022年b）。固定目标可能导致成熟市场过度部署，并在灵活性[285]最具价值的地区供给不足。因此，规划应具有动态性，并与系统特征[286]以及预期的V1G和车辆到电网作用相一致。[287]

我们研究得出的一项重要政策建议是将 V1G 优先作为一种无悔选项[288]，因为它能够释放大部分系统层面的效益。这可以通过允许动态[289]定价，并更好地协调车辆与电网之间的实时协调来实现。此外，在光伏主导系统中，当日内价格波动显著[290]或替代性灵活性有限时，V2G 可能具有经济吸引力，其中包括电网扩建被推迟的情景。这些[291]研究结果表明，V2G 的成本最优部署主要取决于底层能源系统的特征。[292]更广泛地说，此处确定的结构性驱动因素可为国家级和次国家级评估提供参考，并表明协调的 V1G 和 V2G 部署不[293]仅能降低系统总成本、减轻能源系统其他部分的压力，还能减少对额外能源基础设施的需求，例如固定式电池、可调度发电[294]或输电扩建。通过利用电动汽车车队中已经具备的灵活性，这种[295]协调能够助力实现更加节约材料的能源转型。[296] [297] [298][299]

方法

欧洲能源系统模型

本研究所使用的模型扩展了 Pickering 等人（Pickering 等人，2022年）以及 Tr¨ondle 等人（Tr¨ondle 等人，2019）的模型，该模型从四个主要服务部门刻画能源系统：供热，包括空间供暖、热水供应和烹饪热需求；燃料，涵盖用于难以电气化的工业过程、原料、航空和航运的生物来源燃料及合成燃料；交通运输，包括摩托车、乘用车、公交车、轻型商用车和重型货运车辆；以及电力，涵盖建筑级电器和制冷、客运和货运铁路以及工业过程。

我们的模型涵盖以下能源载体：电力、氢、CO_2, 液态和气态碳氢化合物（煤油、甲醇、柴油和甲烷）、固体燃料（残余生物燃料、城市垃圾和沼气）、低温热（包括空间供暖、热水和烹饪用热）以及车辆行驶距离（细分为道路运输的五个子类别）。这些能源载体可通过各种技术生产、消耗和转换，以满足终端需求。此外，低温热（在家庭和区域尺度上）、氢、电力和甲烷均可储存。我们假设欧洲能够自给自足，因此不考虑欧洲的进口和出口。

年度需求数据来自欧盟统计局（欧盟委员会，2020）、JRC-IDEES（Mantzos 等人，2018）和开放电力系统数据（Wiese 等人，2019）。我们采用 Pickering 等人（Pickering 等人，2022）提出的需求变化假设。除柴油、煤油和甲醇等可利用现有基础设施储存的液体燃料外，所有需求均按时间和空间进行解析。这些燃料可能面临的储存局限性不在本研究范围内。

可再生能源发电容量因子按小时分辨率定义（Pfenninger 和 Staffell，2016年；Staffell 和 Pfenninger，2016 年），并通过设置容量上限来考虑部署限制（Tr¨ondle 等，2019；De Felice 和 Kavvadias，2020）。技术成本和铭牌特性主要取自丹麦能源署的技术目录（丹麦能源署，2024年），并采用2050年的预测数据。

我们为模型新增了若干功能。对配备碳捕集系统的发电厂进行投资，可以结合地质封存，减少农业和工业过程产生的剩余排放，从而支持在2050年实现净零目标。因此，模型允许使用化石燃料，其排放可通过碳捕集与封存（CCS）捕集，并由净负排放技术（如直接空气捕集（DAC））进行抵消。欧洲碳目标规定减排200 Mton CO_2，以计入工业和农业中不可避免的排放；各国也可以抵消其他国家的排放。此外，模型明确表示工业对氢和CO_2 的需求。氢和合成燃料可在各地区间分配，且无需额外成本，因为我们未将燃料交换中的电网约束或运输成本纳入考虑。尽管这一假设为与电动汽车竞争的动力系统（如氢动力或合成柴油动力）创造了有利条件，电动汽车仍然是首选，这表明我们的结果对于这些建模假设具有稳健性。

本分析采用开源能源系统优化框架 Cal-liope（Pfenninger 和 Pickering，2018年）（版本 0.6）实施。模型以小时为时间分辨率，以捕捉电动汽车调度中固有的灵活性动态，同时采用国家级（NUTS 0）空间分辨率。在完美预见条件下，通过单年（2050年）快照优化框架，最小化包括车辆购置成本在内的系统总成本。

跨境输电容量依据 ENTSO-E 对 2040年的预测，定义了受限电网扩建情景（ENTSO-E，2018年）。在适度电网扩建情景中，每条输电线路的初始容量加倍，以放宽约束。在不受约束的

电网扩建情景中，输电容量扩建受动态乘数限制，但实际上不受约束。

我们直接采用 Pickering 等人的电网表征及相关假设（Pickering 等人，2022年）。初始高压输电网络基于 e-HIGHWAY 2050 项目（e-Highway2050 联盟，2015年），该项目提供了由详细电网分析得出的简化跨区域电力传输容量。其中包括 48 项已规划或拟议的升级，来自 2018 年 ENTSO-E《十年电网发展计划》（TYNDP）（ENTSO-E，2018年）。这些容量作为可进一步扩建的下限。由于纯粹线性的电网扩建表征可能低估成本，因此根据近期及规划项目的实际支出，并考虑距离与地形，采用差异化的扩建成本。

道路运输部门

该模型涵盖五个主要道路运输细分领域：乘用车、轻型商用车辆、公交车、重型车辆和摩托车。每个细分领域包含三种相互竞争的动力系统：柴油、电池电动和氢。唯一的例外是摩托车，对其仅考虑电动和液体燃料方案。柴油内燃机动力系统可使用化石柴油，或使用氢衍生燃料及生物基替代燃料。车辆购置成本取自多个数据来源（丹麦能源署，2024年；Burke 等人，2024年）。这些成本乘以预计车辆数量，再按峰值需求进行缩放，以避免低估更换整个车队的成本。

电动动力系统通过两种截然不同的技术进行建模：储能技术和转换技术。储能技术体现了储存电力并在之后释放电力的能力，而转换技术则以恒定效率将储存的电力转化为运输服务。对于每种电动技术，都会引入一种额外的载能体，用以表示车载电池中储存的能量。为确保系统随时间稳定运行，并避免因可再生能源可用性而在不同技术之间出现不切实际的切换，我们启用 Calliope约束，确保每个交通运输类别在所有时段的动力总成占比保持不变。每个建模区域的电力储能总容量上限为车辆数量乘以假设的电池容量。车辆数量取自 JRC-IDEES数据库（Mantzos 等人，2017b）。我们不假设车辆数量会增长，因为在不同条件下，车辆数量可能会随着总行驶距离而变化，例如出行方式转变、行为变化，或家庭财务状况的变化。

年度服务需求以车公里表示，并从多个来源获取(欧盟统计局，2025年；Mantzos 等人，2017a）。对于每种交通运输类别，服务需求均以小时为分辨率进行表示。乘用车、轻型车辆和摩托车的国家特定归一化时间曲线由开源随机出行与充电曲线生成器 RAMP-mobility（Mangipinto 等人，2022年）生成，该生成器基于 RAMP 软件（Lombardi 等人，2024年）。公交车和重型车辆的小时活动曲线取自 BASt 数据集（Bundesanstalt f¨ur Straßenwesen (BASt)，2025年），经归一化后扩展至所有国家；在没有更好数据来源的情况下，并视需要考虑时区差异。

情景定义

本研究考察的情景涉及三个主要维度：i）电动汽车充电策略，ii）电网扩展水平，以及 iii）充电基础设施成本。每个维度均由多个情景构成，具体如下。电动汽车充电通过三个情景进行模拟。在无控制情景中，使用 RAMP-mobility 模型模拟充电曲线，以反映无序充电模式。电动乘用车的占比并非固定不变；相反，模型会在候选技术中优化部署的充电基础设施，以及车队中电动汽车的占比；

候选技术包括电池电动汽车（EV）、燃料电池电动汽车[394]（FCEV）以及使用传统燃料或合成燃料的柴油车。在 V1G 情景中，[395]充电根据电价信号安排，以最大限度降低系统成本。车载电池[396]的运行受安全荷电状态（SoC）限制约束，并根据各国基于出行[397]模式得出的接入比例，通过时变曲线设定允许的最大充电量。[398]充电基础设施成本假定与无控制情景相同。在[399]V2G 情景中，V1G和V2G基础设施相互竞争部署。车载电池的[400]充电和放电均受到约束，接入率通过概率函数建模；该函数[401]考虑剩余荷电状态，反映即使车辆尚未充满电，仍愿意接入的意愿。[402]电网扩建分为三个情景：有限扩建（最大[403]输电容量为 206 GW）、适度扩建（412 GW）以及不受约束的扩建[404]（2456 GW）。这些充电和电网扩建情景共同支持对车辆灵活性、车队电气化和输电容量[405]对系统总成本和电力流影响的系统分析。关于充电基础设施成本选取的更多细节，[406]将在下一节介绍。[407] [408]

电动汽车建模 [409]

同一交通运输类别中的车辆，即乘用车、轻型车辆、重型车辆[410]、公交车和摩托车，会被汇总。因此，电池容量按[411]节点和交通运输类别进行汇总。本研究改进了电动汽车的表示方式，[412]将其建模为两种不同技术的组合：一种储能技术和一种转[413]换技术。储能技术汇总车队中的电动汽车电池，并[414]储存由电动汽车充电技术提供的电力。转换技术代表[415]车辆动力总成，它将电力转换为行驶距离，转换效率取决于[416]车辆类型。通过约束关联这两种技术的已部署功率容量，确保[417]电动汽车的普及程度与每种技术可用的电池容量成正比。[418]该建模框架使不同的动力系统技术能够满足交通运输需求，[419]同时确保每个时间步中各动力总成所占份额恒定，从而避免随时间变化的[420]交通运输需求满足程度失真。我们计算每个国家和交通运输类别在电动汽车渗透率达到100%时的理论最大电池[421]容量，然后根据内生的电动汽车渗透率对其进行缩放（补充表1）。我们假[422]设乘用车的电池容量为80千瓦时，轻型车辆为150千瓦时，摩托车为15千瓦时，[423]公交车为500千瓦时，重型车辆为1000千瓦时。将车辆[424]电池容量乘以从 Mantzos 等（2018）获取的车辆数量，即可得到[425]电动汽车电池容量的最大值。成本假设见补充说明8。[426] [427]

充电基础设施建模 [428]

充电基础设施被表示为一种转换技术，可将电力转化为[429]可储存在车载电池中、随后由车辆转换[430]技术使用的载能体，以满足服务需求。模型明确表示了两种充电基础设施：[431]单向和双向。单向类型将电力转换为另一种形式，[432]以便储存在电动汽车中，而双向类型则可双向运行。在[433]后一种情况下，会应用往返效率，以计入电力重新注入[434]电网时产生的转换损耗。[435]

在无序充电情景中，单向充电遵循[436] RAMP-mobility 中的无序充电模式。负荷率固定为相应的归一化时间序列，而[437]基础设施容量仍需通过优化确定。[438]

在 V1G 和车辆到电网情景中，充电基础设施的运行不受约束，因此模型可以确定峰值充电容量的最优部署方式。充电和放电的灵活性受表示插电行为的时间序列限制，这些时间序列是使用经过修改的 RAMP-mobility 版本模拟得出的（Sanvito，2025年）。这些归一化时间序列用于限制电动汽车电池的最大充放电功率，确保能量流与插电模式保持一致。模型不对电动汽车电池的荷电状态施加约束。电池技术还设有上、下安全边界，确保荷电状态最低为 20%，最高为 80%。

基础设施成本因应用场景、类型、已安装充电器的数量以及V2G能力而异（Lanz等人，2022年；Borlaug等人，2020；Nicholas，2019；Nelder和Rogers，2019；Wood 等人，2023；Bernard等人，2022a）。为考虑这种差异，我们为每种车辆类型选取平均成本（Herbst等人，2023；Bennett等人，2022），并区分V1G和V2G充电。鉴于模型的聚合层级以及未来充电基础设施成本存在不确定性，我们开展了敏感性分析，以评估基础设施成本变化以及V1G与V2G之间的相对成本差异对系统的影响。我们不对V2G参与者假设任何外生报酬费用。此外，我们不区分充电基础设施的充电功率等级，所采用的成本为平均值。

我们还对燃料电池汽车的加氢站进行建模，并分配投资和运维成本（Bracci等，2024年）。假设这些加氢站以气相形式供应氢。

充电基础设施和加氢站成本的进一步细节见补充说明9。

在本研究中，我们聚焦于乘用车，因为与商用车相比，乘用车的停车时间最长，出行模式也最为多变。假设所有其他技术均可灵活充电，这代表了一种保守情景，用于评估智能充电和双向充电为能源系统中的私人乘用车带来的额外效益。

V1G和车辆到电网的能源系统效益

我们将系统效益定义为相对于无序充电情景的能源系统总成本降幅。V1G的效益量化为无序充电和V1G情景之间的系统总成本差异。车辆到电网的增量效益首先通过确定车辆到电网情景相对于无序充电情景的总成本降幅，随后再扣除V1G效益来计算。该方法分离出了系统成本节约中完全归因于V2G运行的部分。

在进行国别效益估算时，系统总成本还包括与电力和燃料进出口相关的收入和成本，计算方法是将进出口量乘以相应的能源载体影子价格。由于碳预算是在欧洲层面设定的，且这些成本在不同情景或国家之间差异不大，因此不计入与 CO_2 捕集和管理以及跨境碳补偿相关的成本。

充电需求和利用率

充电需求定义为充电基础设施的峰值容量与其所服务的车辆数量之比。这两个变量由一个称为充电需求系数（CRC）的系数联系起来，如公式（1）所示。该系数的推导在公式（2）中给出。

$$\frac{\text{charging}}{\text{requirements}} = \frac{1}{\text{load factor}} \times \text{CRC} \tag{1}$$

$$\text{CRC} = \frac{\text{charging}}{\text{requirements}} \times \text{load factor} = \\ = \frac{\text{avg cons} \times \text{avg distance}}{\text{timesteps}} \times \left(1 + \frac{\text{discharge}_{\text{V2G}} \times \left(1 + \frac{1}{\eta_{V2G}}\right)}{\text{charge}_{\text{mob}}}\right) \tag{2}$$

CRC与平均车辆能耗（千瓦时·车辆$^{-1}$）、年均行驶距离（km·车辆$^{-1}$ 年$^{-1}$）、以小时计的时间范围，以及一项计入通过车辆到电网运行放出的电力的项成正比。具体而言，最后一项表示通过车辆到电网运行放出的电力与满足电动汽车车队出行需求所需额外充电之间的比值，其中 η_{V2G} 表示V2G 充电器的往返效率。推导公式2所用的计算顺序见补充说明 6。

充电需求上限和下限

模型未考虑国家以下层级的空间差异，导致优化结果高估了基础设施利用率。由于模型未对充电站位置进行建模，优化过程可能会将充电活动分配给容量较低的充电基础设施，从而最大限度地提高负荷率。实际上，部分充电站会因其位置而利用不足，但国家层面的汇总充放电曲线仍会与模型优化得出的曲线大致相似。

为捕捉这一影响，我们逐步提高可部署充电容量上限，同时保持总充电能量不变。通过这种方法，我们能够确定在智能充电和车辆到电网情景下，仍能带来净系统效益的最大基础设施部署规模。因此，能源系统决定了额外容量不再降低系统总成本的临界点。由此，我们可以确定充电设施部署或充电基础设施需求的上限，而下限则由能源系统优化的结果表示。值得注意的是，不同情景下的充电量和时间模式保持不变；只有可用峰值容量增加，从而直接降低负荷率。

如图3所示，这些充电需求上限点位于与参考情景相同的充电需求曲线上，对应于下限水平。因此，我们根据相同的曲线关系计算所得负荷率，并通过将各国系统效益除以充电基础设施的平均单位成本，确定相应的最大充电需求。当同时部署 V1G 和车辆到电网充电器时，我们使用两者各自基础设施成本的加权平均值。

由于一些国家的系统效益为负值，我们在计算各国的 V1G 或车辆到电网效益时，首先从系统效益总计中扣除相应的负值贡献。随后，仅在系统效益为正的国家之间重新分配剩余的正系统效益（补充说明 7）。

敏感性分析

除了已有的用于检验研究结果稳健性的情景外，我们还进行了若干敏感性分析。我们考察了两种主要的敏感性。第一种涉及充电基础设施和光伏技术的成本。在这种情况下，我们将 V1G 和车辆到电网的成本设为相同数值，以检验车辆到电网相对于 V1G 的渗透率。这一点很重要，因为在核心模型设定中，车辆到电网因具备更强的双向功能而成本更高。第二种敏感性分析中，我们将光伏技术的成本降低 50%。这使我们能够

确定车网互动（V2G）普及是否与各国光伏部署的增加相关。

我们还采用有针对性的多目标遗传算法分析，检验关键发现是否偏离成本最优区域附近的结果（Lombardi 等人，2025年）。具体而言，我们实施V2G强化和光伏弱化，同时将能源系统总成本的5%作为松弛幅度。

我们发现，将V1G和车辆到电网基础设施成本拉平，会显著增加双向充电设施部署，但对V2G放电影响甚微，这表明基础设施成本差异主要影响投资选择，而非运行。相比之下，降低光伏投资成本会减少充电基础设施部署，并显著增加V2G放电，凸显V2G利用率对光伏可用性的高度依赖。近优分析证实了这一关系，表明只有在光伏部署足够高的系统中，增加V2G运行才有效。结果见补充说明2。

数据可用性

用于生成本研究结果的数据和模型实例可在 Zenodo 上获取：
https://doi.org/10.5281/zenodo.18433372。本研究的结果可在 Zenodo 上获取：
https://doi.org/10.5281/zenodo.18431612。

代码可用性

本研究使用的软件版本可在 GitHub 上获取：https://github.com/FraSanv
it/calliope/tree/0.6-v2g。

参考文献

Bennett, J., Mishra, P., Miller, E., Borlaug, B., Meintz, A., and Birky, A.（2022）。估算为8级电动牵引车充电的输送电力盈亏平衡成本。技术报告 NREL/TP-5400-82092，美国国家可再生能源实验室。访问日期：2025年10月29日。 Bernard, M. R., Kok, I., Dallmann, T., and Ragon, P.-L.（2022a）。部署充电基础设施，以支持加速向零排放车辆转型。技术报告，国际清洁交通委员会（ICCT）。访问日期：2025年11月2日。 Bernard, M. R., Nicholas, M., Wappelhorst, S., and Hall, D.（2022b）。AFIR提案综述：欧盟公共充电基础设施需要多大的功率输出？白皮书，国际清洁交通委员会（ICCT）。2022年3月17日。 Bogdanov, D. and Breyer, C.（2024）。电动汽车智能充电与车网互动在国家层面综合可再生能源能源系统中的作用。《能源》，301:131635。 Borlaug, B., Salisbury, S., Gerdes, M., and Muratori, M.（2020）。美国电动汽车充电平准化成本。《焦耳》，4(7):1470–1485。 Bracci, J., Koleva, M., and Chung, M.（2024）。重型车辆加注氢气的平准化成本。技术报告 NREL/TP-5400-88818，美国国家可再生能源实验室。访问日期：2025年10月29日。 Brown, T., H orsch, J., and Schlachtberger, D.（2018a）。PyPSA：电力系统分析Python工具。《开放研究软件期刊》，6(1):4。 Brown, T., Neumann, F., and Riepin, I.（2025）。无燃料成本的价格形成：需求弹性与储能竞价的相互作用。《能源经济学》，147:108483。 Brown, T., Schlachtberger, D., Kies, A., Schramm, S., and Greiner, M.（2018b）。成本优化、高度可再生的欧洲能源系统中行业耦合与输电网强化的协同效应。《能源》，160:720–739。德国联邦公路研究所（BASt）（2025）。德国联邦公路自动计数站——原始数据（DZ）。 https://www.bast.de/DE/Publikationen/Daten/Verkehrstechnik/DZ.html?nn=427910 访问日期：2025年10月29日。 Burke, A. F., Zhao, J., and Fulton, L. M.（2024）。轻型电池电动汽车和燃料电池汽车的成本预测（2020–2040）及相关经济问题。《交通经济学研究》，105:101440。欧盟委员会（2024）。《欧盟交通数据——2024年统计手册》。 Crozier, C., Morstyn, T., and McCulloch, M.（2020）。智能充电在减轻电动汽车对输电与配电系统影响方面的机遇。《应用能源》，268:114973。丹麦能源署（2024）。商用货运与客运技术目录。访问日期：2025-09-24。 De Felice, M. and Kavvadias, K.（2020）。Energymodelling-toolkit/hydro-power-database：JRC水电数据库，第07版。 https://zenodo.org/record/5215920 Zenodo。

e-Highway2050 联盟（2015年）。泛欧洲输电系统2050年模块化发展计划。https://docs.entsoe.eu/baltic-conf/bites/www.e-highway2050.eu/e-highway2050/。访问日期：2025年10月28日。ENTSO-E（2018年）。TYNDP 2018情景报告。技术报告，欧洲输电系统运营商（电力）（ENTSO-E）。访问日期：2025年4月27日。ENTSO-E和ENTSOG（2024年）。TYNDP 2024情景报告。欧洲输电系统运营商（电力）（ENTSO-E）和欧洲输气系统运营商（ENTSOG）。下载自2024年ENTSO-E/ENTSOG情景页面。欧盟委员会（2019）。欧洲绿色协议。https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640。欧盟委员会通信文件，COM（2019年）640 final。欧盟委员会（2020）。欧盟统计局数据库。https://ec.europa.eu/eurostat/data/database。访问日期：2025年10月28日。欧盟委员会（2021a）。关于促进使用可再生能源的欧洲议会和理事会指令提案（重订版）。https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0575。提案，COM（2021年）575 final。

欧盟委员会（2021b）。《Fit for 55一揽子计划》：实现欧盟2030年气候目标，迈向气候中和。https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550。欧盟委员会通讯，COM(2021) 550 final。

欧盟委员会（2022）。REPowerEU：欧洲联合行动，推动能源更加可负担、安全且可持续。https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0221。2022 221。欧盟委员会通讯，COM( ) final。

欧盟委员会（2023）。轿车和厢式货车二氧化碳排放性能标准。https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en。访问日期：2025年4月26日。

欧盟委员会（2025年）。替代燃料基础设施条例（AFIR）。https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/alternative-fuels-sustainable-mobility-europe/alternative-fuels-infrastructure_en。2025 11 24。访问日期：--。

欧洲环境署（2022）。欧洲出行系统的可持续性——气候影响。https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems/climate。访问日期：2025年4月26日。欧盟统计局（2025）。按类别划分的道路运输车辆——表格 road tf veh。https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_tf_veh/default/table?lang=en&category=road.road_tf。访问日期：2025年11月2日。欧盟统计局——欧盟委员会（2025）。按类别和 NUTS 2区域划分的电动汽车存量（数据集：tran r elvehst）。数据截至2025年5月；访问日期：2025年7月26日。Graabak, I., Wu, Q., Warland, L. 和 Liu, Z.（2016）。规划含100<style id='Energy'>能源的北欧输电系统的最优方案，107：648–660。

Gunkel, P. A., Bergaentzl´e, C., Græsted Jensen, I. 和 Scheller, F.（2020）。从被动到主动：621 输电系统发展背景下的电动汽车灵活性。《应用能源》，277：115526。623 Gu´eret, A., Schill, W.-P. 和 Gaete-Morales, C.（2024）。电动汽车共享对可变可再生能源电力行业的影响。《细胞报告：可持续发展》，1(11)。出版商：爱思唯尔。625 Hanemann, P., Behnert, M. 和 Bruckner, T.（2017）。电动汽车充电策略对德国电力系统的影响。《应用能源》，203：608–622。627 Helgeson, B. 和 Peter, J.（2020）。电力在欧洲道路交通脱碳中的作用——综合多部门模型的开发与评估。《应用能源》，262：114365。629 Herbst, I., Barth, J., Daneshgar, G., Furrer, R., Heer, L., Hickethier, M., Mathis, U., Rosser, S., Trottmann, M., Vischer, M., Wahl, H. 和 Walter, S.（2023）。社区充电：面向各市镇的电动出行信息汇编。访问日期：10月；为瑞士联邦能源局（BFE）的电动出行路线图编制。634 国际能源署（2021）。《全球电动汽车展望2021》。https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021。国际能源署，巴黎。许可：知识共享署名4.0国际许可协议。63 国际能源署（2025）。《全球电动汽车展望2025》。国际能源署，巴黎。许可：知识共享署名4.0国际许可协议。https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025。637 ）。638 《全球电动汽车展望》。国际能源署，巴黎。许可：知识共享署名4.0国际许可协议。Kalweit, S., Zeyen, E. 和 Victoria, M.（2025）。不同气候目标下欧洲陆路交通的内生转型。640 Kern, T. 和 Kigle, S.（2022）。欧洲未来能源系统中双向充电电动汽车的建模与评估。《能源报告》，8(2)：694–708。642 Lanz, L., Noll, B., Schmidt, T. S. 和 Steffen, B.（2022）。比较欧洲电动汽车充电方案的平准化成本。《自然·通讯》，13(1)：5277。644 Lombardi, F., Duc, P.-F., Tahavori, M. A., Sanchez-Solis, C., Eckhoff, S., Hart, M. C., Sanvito, F., Ireland, G., Balderrama, S., Kraft, J., Dhungel, G. 和 Quoilin, S.（2024）。RAMP：用户驱动的能源需求时间序列随机模拟。《开放源代码软件期刊》，9(98)：6418。648 Lombardi, F., van Greevenbroek, K., Grochowicz, A., Lau, M., Neumann, F., Patankar, N. 和 V¨ager¨o（2025）。采用生成备选方案的建模方法，以灵活探索实际可取选项的近优能源规划策略。《焦耳》，9(11)。出版商：爱思唯尔。650 Mangipinto, A., Lombardi, F., Sanvito, F. D., Pavi˘cevi´c, M., Quoilin, S. 和 Colombo, E.（2022）。大规模部署电动汽车的影响及智能充电在所有欧洲国家的益处。《应用能源》，312：118676。653 Mantzos, L., Rozsai, M., Matei, N. A., Mulholland, E., Tamba, M. 和 Wiesenthal, T.（2018）。JRC-IDEES 2015。655 Mantzos, L., Wiesenthal, T., Matei, N., Tchung-Ming, S., Rozsai, M., Russ, P. 和 Soria Ramirez, A.（2017a）。JRC-IDEES：欧洲能源部门综合数据库：方法说明。技术报告，联合研究中心（塞维利亚站点）。

Mantzos, L., Wiesenthal, T., Matei, N., Tchung-Ming, S., R´ozsai, M., Russ, H., 和 Soria Ramirez, 659 A. (2017b). JRC-IDEES：欧洲能源部门综合数据库：方法说明。660 技术报告 JRC108244，欧盟出版局，卢森堡。661 Miorelli, F., Wulff, N., Fuchs, B., Gils, H. C., 和 Jochem, P. (2025). venco.py：一种用于在能源系统模型中表示电动汽车充电灵活性和车网互动潜力的 Python 模型。《开放源代码软件期刊》，10(108):6896。664 Muessel, J., Ruhnau, O., 和 Madlener, R. (2023). 在能源系统模型中准确且可扩展地表示电动汽车：一种基于虚拟储能的聚合方法。iScience，26(10)。666 出版商：爱思唯尔。667 Muratori, M. (2018). 无序插电式电动汽车充电对居民用电需求的影响。《自然·能源》，3(3):193–201。669 Needell, Z., Wei, W., 和 Trancik, J. E. (2023). 促进电动汽车充电以降低峰值电力需求并储存太阳能的策略。《细胞报告·物理科学》，4(3):101287。671 Nelder, C. 和 Rogers, E. (2019). 降低电动汽车充电基础设施成本。技术报告，落基山研究所（RMI）。访问日期：2025年11月2日。673 Nicholas, M. (2019). 估算美国主要大都市地区的电动汽车充电基础设施成本。技术报告，国际清洁交通委员会（ICCT）。访问日期：2025年11月2日。676 Parajeles Herrera, M., Garrison, J., 和 Hug, G. (2026). 单向充电灵活性在未来瑞士电力系统规划与运行中的作用。《应用能源》，678 403 127078 679：。Pfenninger, S. 和 Pickering, B. (2018). Calliope：多尺度能源系统建模框架。《开放源代码软件期刊》，3(29):825。681 Pfenninger, S. 和 Staffell, I. (2016). 利用30年经验证的逐小时再分析数据和卫星数据分析欧洲光伏发电量的长期模式。《能源》，114:1251–1265。683 Pickering, B., Lombardi, F., 和 Pfenninger, S. (2022). 消除化石燃料并实现整个欧洲能源系统碳中和的多种选择。《焦耳》，6(6):1253–1276。685 Powell, S., Cezar, G. V., Min, L., Azevedo, I. M. L., 和 Rajagopal, R. (2022). 通过充电基础设施的接入与运营，降低电动汽车大规模普及对电网的影响。《自然·能源》，7(10):932–945。688 Sanvito, F. (2025 2 https://github.com/FraSanvit/RAMP-mobility/tree/V2G_output 2025 04 27 689). 690

RAMP-mobility（版本 v g output）。. 访问日期：--。Staffell, I. 和 Pfenninger, S. (2016). 使用偏差校正的再分析数据模拟当前和未来的风力发电量。《能源》，114:1224–1239。692 Syla, A., Parra, D., 和 Patel, M. K. (2025). 使用开源能源系统模型评估电动汽车灵活性：智能充电、车网互动与广泛充电基础设施之间的权衡。《能源》，326:136236。695 Syla, A., Rinaldi, A., Parra, D., 和 Patel, M. K. (2024). 个人交通电气化的最优容量规划：灵活充电与能源系统基础设施的相互作用。《可再生与可持续能源评论》，192:114214。698

¨ Tr¨ondle, T., Pfenninger, S., 和 Lilliestam, J. (2019). 自建还是进口：欧洲各个尺度实现可再生电力自给的可能性。《能源战略评论》，26:100388。700 Verzijlbergh, R., Brancucci Martı´nez-Anido, C., Lukszo, Z., 和 de Vries, L. (2014). 可控电动汽车充电能否替代跨境输电容量？《应用能源》，120:169–702 180 703。Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G. B., 和 Greiner, M. (2019). 储能技术在部门耦合的欧洲能源系统脱碳过程中的作用。《能源转换与管理》，201:111977。706 Wang, Z., Sasse, J.-P., 和 Trutnevyte, E. (2025). 家庭充电还是工作场所充电？电动汽车在瑞士电力系统中的时空灵活性。《能源》，320:135452。708 Wiese, F., Schlecht, I., Bunke, W.-D., Gerbaulet, C., Hirth, L., Jahn, M., Kunz, F., Lorenz, C., M¨uhlenpfordt, J., Reimann, J., 和 Schill, W.-P. (2019). 开放电力系统数据——用于电力系统建模的无障碍数据。《应用能源》，236:401–409。711 Wood, E., Borlaug, B., Moniot, M., Lee, D.-Y., Ge, Y., Yang, F., 和 Liu, Z. (2023). 2030年国家充电网络：估算美国轻型车辆电动汽车充电基础设施需求。技术报告NREL/TP-5400-85654，美国国家可再生能源实验室（NREL）。访问日期：2025年11月2日。715 Wulff, N., Steck, F., Gils, H. C., Hoyer-Klick, C., van den Adel, B., 和 Anderson, J. E. (2020). 比较电力系统导向和用户导向的纯电动汽车充电表示方法及其对能源系统建模的影响。《能源》，13(5)。718 Zeyen, E., Kalweit, S., Victoria, M., 和 Brown, T. (2025). 转移负担：道路运输脱碳延迟如何影响其他行业的减排。《环境研究快报》，20(4):044044。721

致谢

我们感谢使用由代尔夫特高性能计算中心（https://www.tudelft.nl/dhpc）提供的 DelftBlue 超级计算机计算资源。

本研究在 PATHFNDR 项目框架内开展，该项目由瑞士联邦能源局的 SWEET 计划资助，资助编号 SI/502259。

F.S. 感谢 Bryn Pickering 开发 Calliope 结果的后处理脚本和地图绘制脚本的初始版本，并就交通运输和能源系统建模问题进行了富有见地的讨论。

补充信息

补充说明1：电动汽车车队荷电状态.2 补充说明2：敏感性分析.2 补充说明3：量化各情景维度的相对影响3 补充说明4：忽略充电基础设施成本的影响. . . . 4 补充说明5：局限性.4 补充说明6：充电需求和利用率. . . . . 6 补充说明7：充电需求上下限的计算范围.6

补充说明8：车辆成本假设 .7 补充说明9：充电基础设施 .7 补充图 .9 补充表 .25

补充材料 ary说明1：电动汽车车队荷电状 e

我们对电动汽车（EV）车队中不同情景下的电池利用率进行现实检验，特别关注车网互动（V2G）运行通过向电网注入电力增加电池循环、并导致相关额外充电需求的情况。分析重点包括两个方面：(i) 每小时电池利用率；(ii) 荷电状态（SoC）的每日变化。

补充图1 表明，即便在从电池利用率角度看最为不利的情形（低成本、有限电网扩建以及车辆到电网）下，荷电状态（SoC）的小时变化仍低于电动汽车车队总电池容量的2%。在其余假设保持不变的情况下，零成本情形的利用率大幅提高，小时SoC变化峰值约为5%，相对于低成本情形，小时电池使用量增加了一倍以上。

补充图2 表明，日SoC变化最高可达 ±10%。在若干国家中，可观察到工作日与周末之间存在系统性差异。在工作日，电动汽车充电与电动汽车用电之间的平衡以负值为主，而在周末则转为正值，从而为电动汽车车队的电池补充电量。这一模式反映了周末乘用车活动低于工作日，以及充电水平略高（可能由较低电价驱动）的综合效应。

补充说明2：敏感性分析

除所构建的情景集外，我们还开展了如下额外的敏感性分析。

首先，我们通过为 V1G 和 V2G 设定相同的基础设施成本，消除与双向功能相关的成本差异，以检验与车网互动基础设施部署相关结果的稳健性。结果见表 1。该调整应用于两个适度电网扩建情景，即成本基准情景和低成本情形。我们发现，尽管双向充电部署大幅增加，并几乎完全取代单向智能充电基础设施，车网互动放电量基本保持不变。在这种情况下，与双向能力相关的额外成本会显著影响所部署的基础设施类型，但不会影响其运行。相比之下，将光伏投资减少 50 % 会导致相反的结果：基础设施部署减少，而 V2G 运行显著增加。在成本基准情景中，V2G放电量从 12 太瓦时增至 99 太瓦时（补充图 3c）；在低成本情形中，则从 79 太瓦时增至 307 太瓦时（补充图 3d）。较低的光伏成本有利于光伏部署，从而提高 V2G利用率。

其次，我们开展生成替代方案建模分析（Lombardi 等人，2025年），以评估近优区域内与成本最优解的偏差。具体而言，我们允许总能源系统成本（包括车辆成本）有 5% 的浮动空间，从而降低光伏部署强度并提高 V2G运行强度。

当光伏安装量最小化时，V2G放电大幅减少：在低成本情景中减少42%，在低成本情景中减少82%（补充图3e 和 3f）。相反，当加强 V2G运行时，只有已经出现车网互动普及率的国家，其 V2G放电量才会增加（补充图3g 和 3h）。总体而言，这些结果表明，更高的光伏部署会推动 V2G 运行增加，而加强 V2G 运行只有在光伏容量得到充分部署时才有效。

补充说明3：量化各情景维度的相对影响

为量化每个情景维度对模型结果的相对影响，我们计算了分层有符号的 Shapley 型权重。对于每项技术 g，我们首先汇总输出变量（例如装机容量）在各情景维度 d 中的绝对变化，以确定其相对大小。在每个维度内，我们进一步按照子类型 u（对应于具体的情景转换，例如在充电维度中：无序充电→V1G 和 V1G→车辆到电网）以及其贡献的符号（正或负）对影响进行细分。每个子类型的影响都可以分解为其构成修改项 $\Delta_{g,\,t}$，即

$$a_{g,d,u} = \sum_{t \in T_{g,d,u}} \Delta_{g,t}, \qquad A_{g,d} = \sum_{u \in \mathcal{U}_{g,d}} a_{g,d,u} = \sum_{u \in \mathcal{U}_{g,d}} \sum_{t \in T_{g,d,u}} \Delta_{g,t}. \tag{1}$$

这些子类型层面的效应在各维度内进行了归一化，以反映其内部组成。随后，将所得的分层绝对权重与各子类型净效应的符号相结合，并进行归一化，使每种技术的绝对权重之和等于一。由此得到的带符号权重表示各维度和子类型对模型总体差异的比例贡献。

我们根据公式（ d^* 定义每个目标维度的相对份额，以及该维度内每个目标子类型的归一化贡献 u^* ： 2）。

$$p_{g,d^*} = \frac{A_{g,d^*}}{\sum_d A_{g,d}}, \qquad q_{g,d^*,u^*} = \frac{a_{g,d^*,u^*}}{\sum_{u \in \mathcal{U}_{g,d^*}} a_{g,d^*,u}}, \tag{2}$$

其中，$A_{g、\,d}$ 和 $a_{g、\,d、\,u}$ 的定义同上，分别表示各维度和子类型的绝对变化总量。

最终的带符号归一化分层权重由公式（3）给出。

$$w^{\mathrm{norm}}_{g,d^*,u^*} = \mathrm{sgn}\Big(a_{g,d^*,u^*}\Big)\; p_{g,d^*}\; q_{g,d^*,u^*}, \tag{3}$$

其中，$\mathrm{sgn}(x) = +1$ 若满足 $x \geq 0$，否则为 -1。此处，d^* 和 u^* 分别表示计算权重所针对的维度和子类型；分母中的 d和 u 则分别表示对所有维度，以及各维度内所有子类型求和。对于每种技术 g，此归一化确保 $\sum_{d^*、\,u^*} |w^{\mathrm{norm}}_{g\,d^*、\,,\,u^*}| = 1$，从而可直接比较不同技术中各维度和子类型的相对贡献。

该方法同样适用于分析装机容量或能量流的变化。下文将比较低成本情景下不同充电策略和电网扩建情景的影响。

该方法尤其适用于研究 V1G 和车辆到电网对可调度技术部署的影响，而非输电扩建的作用，因为充电策略和电网扩建都能提高系统灵活性。总体而言，所有低成本情景下的可调度容量均减少了 12% 至 50%。根据所采用的 Shapley 方法，V1G 对这一降幅的贡献最大，其次是输电扩建和车辆到电网。

对可调度技术进行细分后发现，电池储能是部署最广泛的选项，其部署主要受 V1G 启用的影响，而电网扩建和车辆到电网的影响相近。相比之下，联合循环燃气轮机和热电联产技术的减少，主要是由输电网从中等情景扩展至不受限情景所推动。这凸显了 V1G 的潜力：在输电容量仍受限的情景下，大幅减少可调度发电的部署（补充图 4）。

补充图 4g–i 展示了电力行业与供热行业之间的跨行业互动[95]。电力行业灵活性降低会导致热电联产容量减少，[96]从而为增加热泵部署创造空间。热电联产容量的下降[97]主要由电网扩建推动，而热泵渗透率的提高则由 V1G 和车网互动（V2G）普及共同促成。在补充图 5中，我们展示了能量流的结果。[99]

这些影响的幅度取决于关于充电基础设施成本的假设。[100]因此，我们还报告了明确考虑成本[101]变化的容量部署变化。[102]

补充说明4：忽略充电基础设施成本的[103]影响[104]

将成本计入充电基础设施不仅会影响系统总成本，还会影响[105]电动汽车（EV）的调度。虽然将充电基础设施成本加入车辆成本[106]并不会直接改变电动汽车充电曲线的形状，但会显著影响充电事件[107]的调度、基础设施部署和利用率。[108]

首先，零成本情景中的充电曲线与[109]光伏发电在时间上高度一致，从而导致显著的午间充电负荷峰值，如补充[110]图6 （零成本）和补充图7 （基准成本）所示，二者均处于适度电网[111]扩建情景中。这些结果完全忽略了显著的午间[112]充电峰值可能使配电网过载的潜在影响。[113]

换言之，电动汽车充电决策完全由电价驱动，而未考虑 [114]充电基础设施所需的投资。在这一假设下，与无序充电相比，转移的 [115]电动汽车负荷占比为 77% 至 80%。纳入充电基础设施成本并将其从高到低调整后，单向充电情景中的转移电动汽车负荷降至 44–59%（补充图[116]8）。[118]

此外，尖峰型充电曲线的负荷率为 1–20%，而单车充电 [119]容量则升至 11.4–16.3 kW，远超 AFIR目标一个数量级。这一结果 [120]表明，忽视充电基础设施成本的研究可能会得出误导性结论，[121]因为其所隐含的充电功率可用性远高于明确考虑基础设施成本时的情况。随着充电基础设施成本上升，已部署容量下降，[122]利用率上升，反映出对高成本资产的部署更加精简。相反，当 [123]充电基础设施成本下降时，电动汽车调度越来越受电价信号驱动。[126]

充电基础设施成本也会显著影响车辆到电网运行。当不计成本时，[127]假设单向和双向充电基础设施的成本相同，因此[128]车网互动馈电量较高。车辆到电网能量注入量从[129]低成本、有限电网扩建情景下的最高89太瓦时，增至充电基础设施成本[130]为零时的378–389太瓦时（补充图9）。因此，车辆到电网的最高收益从6.4[131]十亿€ （有限电网扩建、低成本情景）大幅升至17.2十亿€，这表明忽略[132]基础设施成本可能会大幅高估车辆到电网的经济潜力（补充[133]图10）。[134]

补充说明5：局限性 [135]

尽管该模型有效，但用于生成本研究结果的模型仍存在一些局限性。[136]

我们的模型采用国家级空间分辨率，每个国家在能源系统中表示为一个节点 [137]。这一选择体现了空间分辨率与时间分辨率之间的权衡，其中[138]

时间分辨率特意设为一小时，以捕捉小时调度决策和电价动态。更精细的空间粒度或可揭示车网互动（车辆到电网，V2G）运行带来的额外收益，尤其是在更高分辨率的输电网络表示引入额外拥塞约束时。尽管本研究未明确探讨这一方面，但可从考察不同输电网扩建水平的情景中推断相关见解。其中，互联线路容量较低往往会提高车辆到电网的系统价值。

此外，尽管配电网可能构成另一个瓶颈，但本研究并未对其进行明确建模。相反，我们通过明确表示充电基础设施，并为其设定非零成本，来近似配电层面的潜在约束。充电基础设施的负荷率经过内生优化，即使在太阳能发电充足且成本低廉的时段，也能降低充电峰值。该机制可视为配电层面变压器或馈线容量限制的替代指标。因此，较高的充电基础设施成本会对充电峰值需求施加更强的惩罚，从而有效削减充电峰值。虽然这些约束并未被明确建模，但引入充电基础设施成本使模型能够捕捉与配电网限制相关的一些基本动态。

此外，本研究未考虑车辆到电网为电力系统提供辅助服务的潜力，而仅考察其与电力平衡市场互动所产生的影响。

本研究重点分析私人乘用车，但模型也涵盖其他交通运输类别，包括重型车辆、轻型车辆、公交车和摩托车。这一选择主要是因为，为非乘用车类别生成真实的出行模式存在很大的不确定性。此外，鉴于这些类别的使用模式和运行要求，它们参与智能充电或车辆到电网的可能性仍存在很大的不确定性。相比之下，乘用车平均每天停放至少 16 小时；若只考虑非活动停放，周末的停车时长甚至更长（Pasaoglu 等人，2012）。

本研究也未考虑充电基础设施的具体空间位置，而这可能会影响部署决策和利用率。尽管如此，我们仍估算了通过部署充电基础设施可实现的系统层面节省的上下界，从而给出其影响预期所在的范围。

为限制模型复杂度和计算负担，模型未明确表示气态燃料运输网络，并假设燃料运输不产生任何额外成本。因此，各国可以自由且无成本地交易氢、合成柴油、合成甲烷、合成甲醇和合成煤油。此外，欧洲能源系统被单独建模，未考虑从欧洲以外地区进口或向其出口。在交通脱碳背景下，这些假设倾向于有利于氢基技术。尽管如此，即便在这些乐观条件下，模型结果仍表明，电动动力系统更具成本效益，尤其是在启用智能充电策略时。因此，这些假设为检验电动汽车的竞争力提供了保守的测试，也进一步支持了本研究结论的稳健性。

作者强调，未来采用 V1G 和车辆到电网，以及由此带来的经济效益，不应被解读为国家特异性特征。相反，这些结果主要取决于底层能源系统的配置，包括发电结构、灵活性选项和输电假设。因此，本研究呈现的国家级结果反映的是对所建模能源系统配置的条件性响应，而非固有的国家趋势。

补充说明 6：充电需求和利用率

这里，我们详细说明充电需求系数（CRC，公式4）的计算方法。在公式5的推导中，负荷率定义为分子与分母之比。分子为充电基础设施处理的能量流总和，可分解为三个部分：与车辆出行相关的充电需求、通过 V2G运行注入电网的电力，以及为补偿 V2G放电所需的额外充电。分母表示充电基础设施能够容纳的最大能量流。

$$\frac{\text{charging}}{\text{requirements}} = \frac{1}{\text{load factor}} \times \text{CRC} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
\text{CRC} &= \frac{\text{charging}}{\text{requirements}} \times \text{load factor} = \\
&= \frac{\text{peak power}_{(\text{V1G+V2G})}}{\text{vehicle number}} \times \frac{\text{charge}_{\text{mob}} + \text{charge}_{\text{V2G}} + \text{discharge}_{\text{V2G}}}{\text{peak power}_{(\text{V1G+V2G})} \times \text{timesteps}} = \\
&= \frac{1}{\frac{\text{charge}_{\text{mob}}}{\text{avg cons} \times \text{avg distance}}} \times \frac{\text{charge}_{\text{mob}} + \text{charge}_{\text{V2G}} + \text{discharge}_{\text{V2G}}}{\text{timesteps}} = \\
&= \frac{\text{avg cons} \times \text{avg distance}}{\text{charge}_{\text{mob}}} \times \frac{\text{charge}_{\text{mob}} \left(1 + \frac{\text{charge}_{\text{V2G}} + \text{discharge}_{\text{V2G}}}{\text{charge}_{\text{mob}}}\right)}{\text{timesteps}} = \\
&= \frac{\text{avg cons} \times \text{avg distance}}{\text{timesteps}} \times \left(1 + \frac{\text{charge}_{\text{V2G}} + \text{discharge}_{\text{V2G}}}{\text{charge}_{\text{mob}}}\right) = \\
&= \frac{\text{avg cons} \times \text{avg distance}}{\text{timesteps}} \times \left(1 + \frac{\text{discharge}_{\text{V2G}} \times \left(1 + \frac{1}{\eta_{V2G}}\right)}{\text{charge}_{\text{mob}}}\right)
\end{aligned} \tag{5}$$

CRC 与平均车辆能耗（千瓦时 车辆$^{-1}$）、年均行驶距离（公里 车辆$^{-1}$ 年$^{-1}$）、以小时计的时间范围，以及一个用于计入车辆到电网运行放电电量的项成正比。具体而言，最后一项表示车辆到电网运行放出的电量与满足电动汽车车队出行需求所需额外充电量之间的比率，其中 η_{V2G} 表示 V2G 充电器的往返效率。推导公式（ 2 ）所用的计算步骤见 《补充信息》。

将充电需求相对于负荷率作图时，相同的 CRC 数值会得到相同的曲线。平均能耗较高，或每辆车的平均行驶距离较长，都会使曲线上移，从而增加充电需求。同样，车辆到电网运行也会使曲线上移。补充图 11展示了成本基准情景的结果。

补充说明 7：充电需求上下界的计算

我们定义充电需求下限和上限。下限对应于能源系统优化所产生的充电设施部署，而上限则是

定义为可产生非负系统效益的最大充电设施部署量。上限的计-算分为三个主要步骤，如补充材料图12中所示。

(a) 我们首先以货币价值计算能源系统效益。将所有国家的能源系统效益相加，同时注意到部分国家的数值可能为负。为处理这一情况，我们通过仅将总货币效益重新分配给系统效益为正的国家，来抵消负系统效益。

(b) 随后，将所得货币价值的系统效益除以平均充电基础设施成本，其中包括投资成本以及运维成本。该平均成本根据单向和双向充电基础设施的成本，按各自的部署水平计算加权平均值。由此可估算可部署的额外充电基础设施容量。保持相同的容量加权成本结构，意味着我们隐含地假设，在 V2G 情景中，扩建后双向充电所占比例保持不变。随后，将新增的可部署容量计入总充电容量，更新其数值。

(c) 从扩增后的充电容量出发，在假设车辆数量保持不变的情况下，计算相应的充电需求。上限的充电需求系数设为与对应下限情景相同，因为电动汽车能耗参数并未改变。由此可以推导出相应的负荷率，并在充电需求与负荷率的关系空间中标示上限对应的点。

S补充说明8：车辆成本假设

我们在能源系统模型中纳入了车辆成本。每种交通运输类别和动力总成均以其投资成本进行建模；在有数据时，也纳入其可变成本和固定成本。乘用车和轻型车辆的数值取自Burke 等人(2024年)，重型车辆和公交车的数值取自丹麦能源署（L1和B1型）（丹麦能源署，2024年）；摩托车则采用我们自行设定的假设。所有成本假设均列于表2中。随后，我们根据峰值运输需求对车辆成本进行归一化，以计入车辆闲置的影响。

补充说明9：充电基础设施

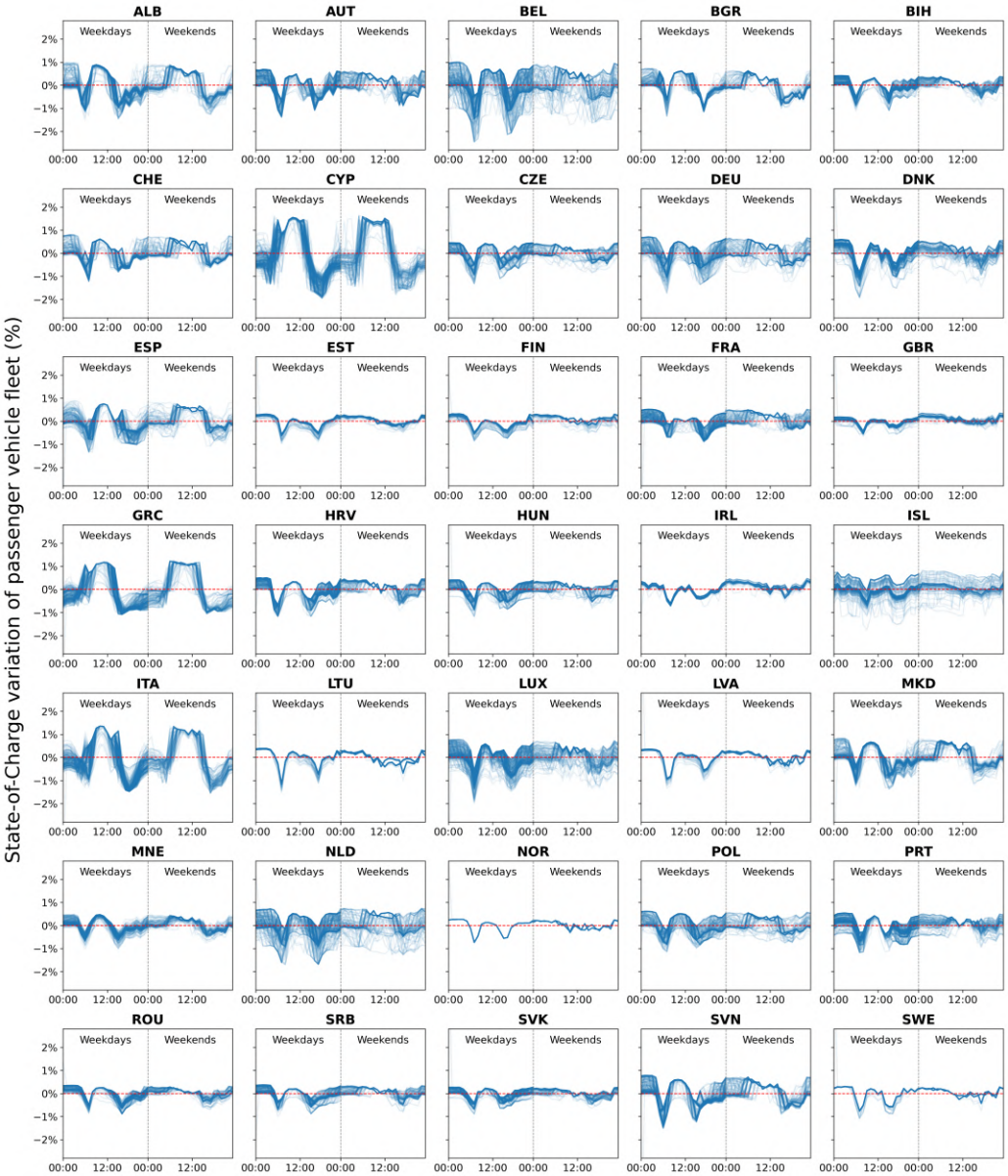
我们定义了四个充电基础设施成本水平，其中包括一个作为比较基准的零成本情形。成本假设基于Herbst 等人(2023）的研究。尽管我们对现有估算进行了更广泛的综述，其结果汇总于补充图13中。由于不同研究的成本明细往往不一致，且充电站布局、额定功率或利用率假设是否具有可比性也并不总是明确，因此充电基础设施成本难以在不同研究之间进行比较。由此，实际成本可能与报告值有所不同。

除基准成本水平外，我们还考虑两种替代成本假设，以进行敏感性分析。这些替代水平既反映了成本随时间可能出现的降低，也体现了不同充电基础设施类型之间的差异。具体而言，单位已安装容量的充电成本可能因站点布局、功率水平和技术配置而有显著差异。由于本研究未对充电器的空间位置或充电技术的组成进行明确建模，因此引入多个成本水平，以反映这种不确定性并评估其对系统结果的影响。所选数值见表 3。

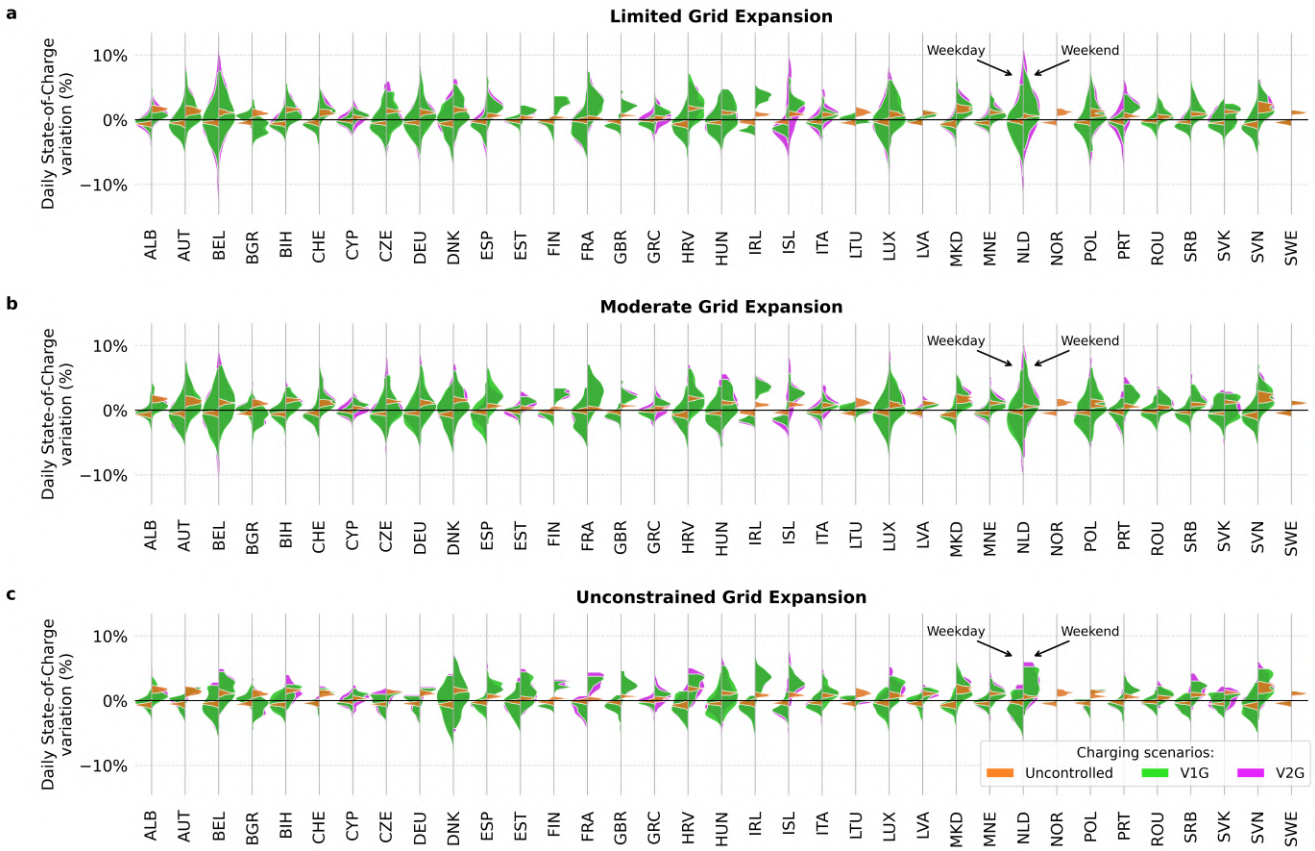
作为参考，宝马于2025年与 E.ON 合作推出了车辆到电网服务。在德国，[252]客户可以选择单向宝马 Wallbox Plus，售价约为 699 € ；也可以选择[253]双向宝马 Wallbox Professional，售价约为 2095 €。使用 iX3 实现车辆到电网功能需要这款充电器[254]以及 E.ON 的特殊电价方案。根据该电价方案，用户每连接车辆一小时可获得约 24 欧分的报酬，[255]每年最高约为 720 €，但车辆到电网充电基础设施的补贴金额仍不明确（[256]Schwarzer，2025年）。[257]

本分析未尝试预测未来充电设备和安装成本。根据[258]（Wood 等人，2023）的报告，利益相关方访谈表明，未来成本趋势存在很大[259]不确定性，规模经济和学习效应可能带来的成本降低，可能会被[260]供应链限制和场地特定的安装挑战所抵消。[261]

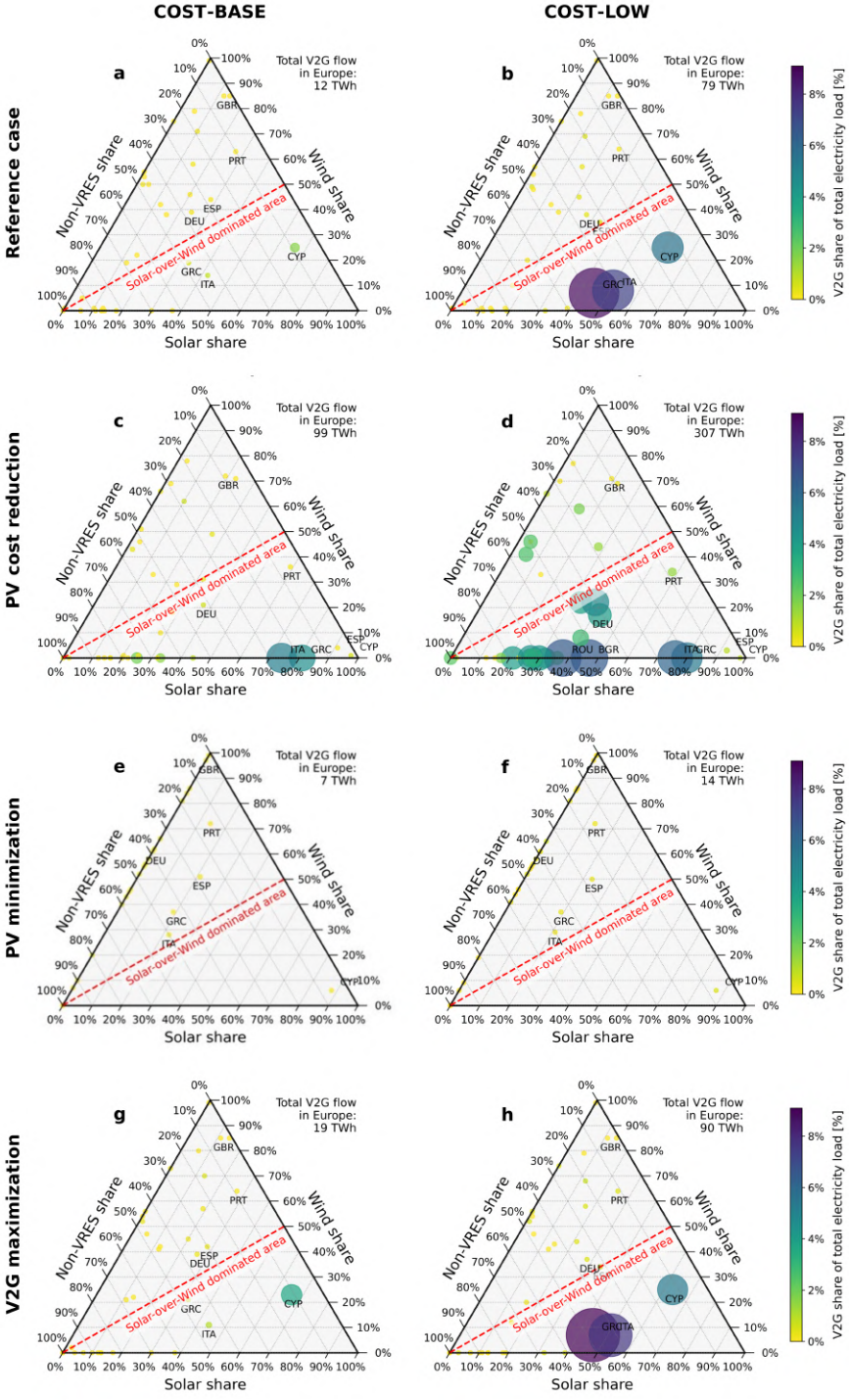
补充图



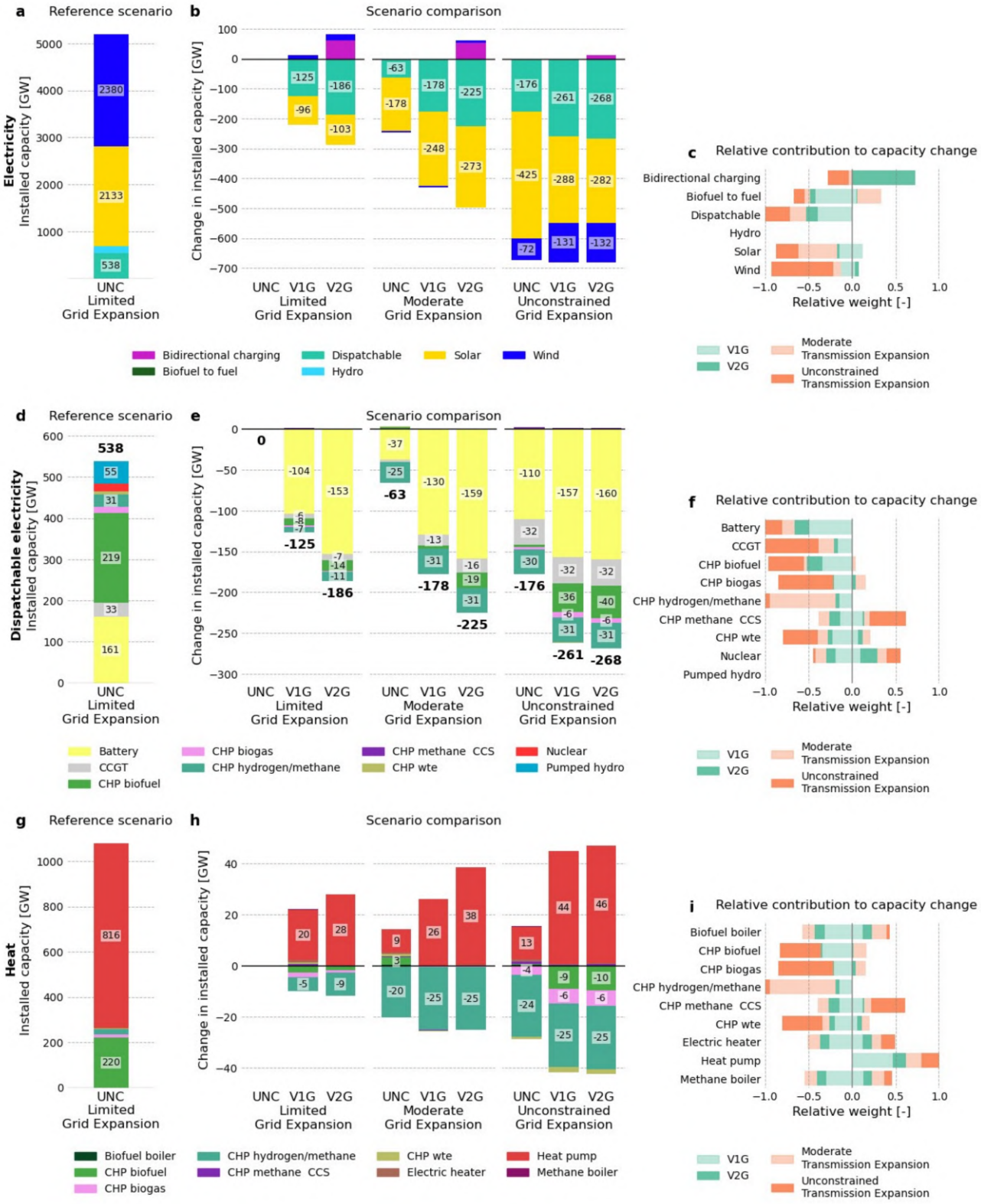
补充图1：欧洲国家聚合电动汽车乘用车队每小时荷电状态（SoC）变化。SoC 时间序列按工作日和周末类别叠加显示。该图展示了有限电网扩建和低成本情形下的车辆到电网（V2G）充电情景结果；与其他非零充电基础设施成本情景相比，这些情形下 V2G 的使用最为频繁。每小时荷电状态变化不超过 2%，表明电动汽车车队电池没有被过度使用。



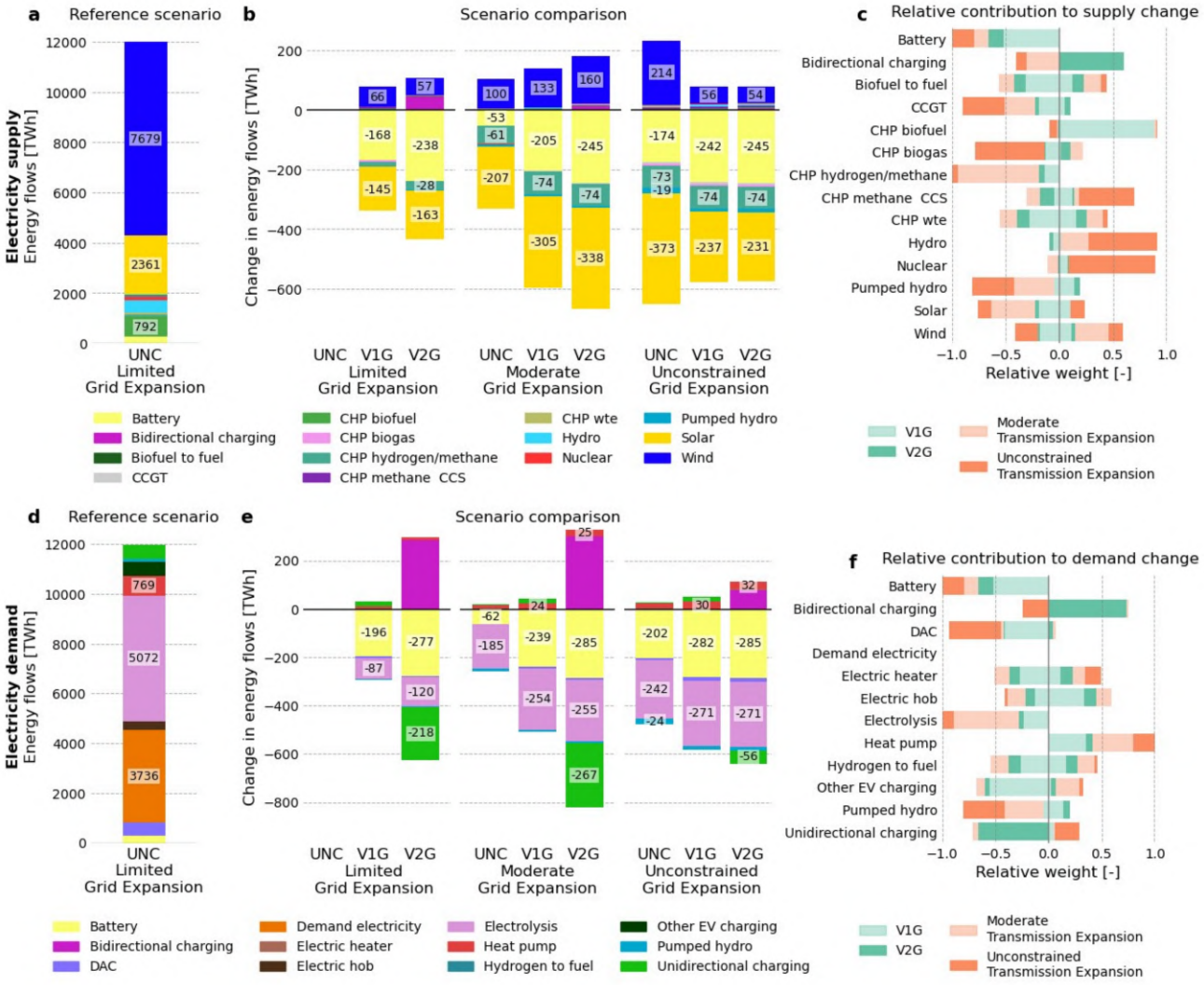
补充图2：工作日和周末的每日荷电状态（SoC）变化。该图以小提琴图展示了各个建模国家的结果，其中两侧分别代表工作日和周末累计的荷电状态差异。结果对应低成本情形下的中度电网扩建情景。



补充图3：敏感性分析三元图。该图展示了在适度电网扩建情景下启用车辆到电网（V2G）时，针对基准成本和低成本两种情景进行敏感性分析所得的能源系统配置三元图。(a–b) 参考案例；(c–d) 地面光伏投资成本降低50%；(e–f) 目标多目标遗传算法分析，以尽量减少光伏技术的部署；(g–h) 目标多目标遗传算法分析，以最大限度提高车辆到电网（V2G）的利用率。在两项多目标遗传算法分析中，系统总成本（包括车辆成本）均采用10%的松弛成本。



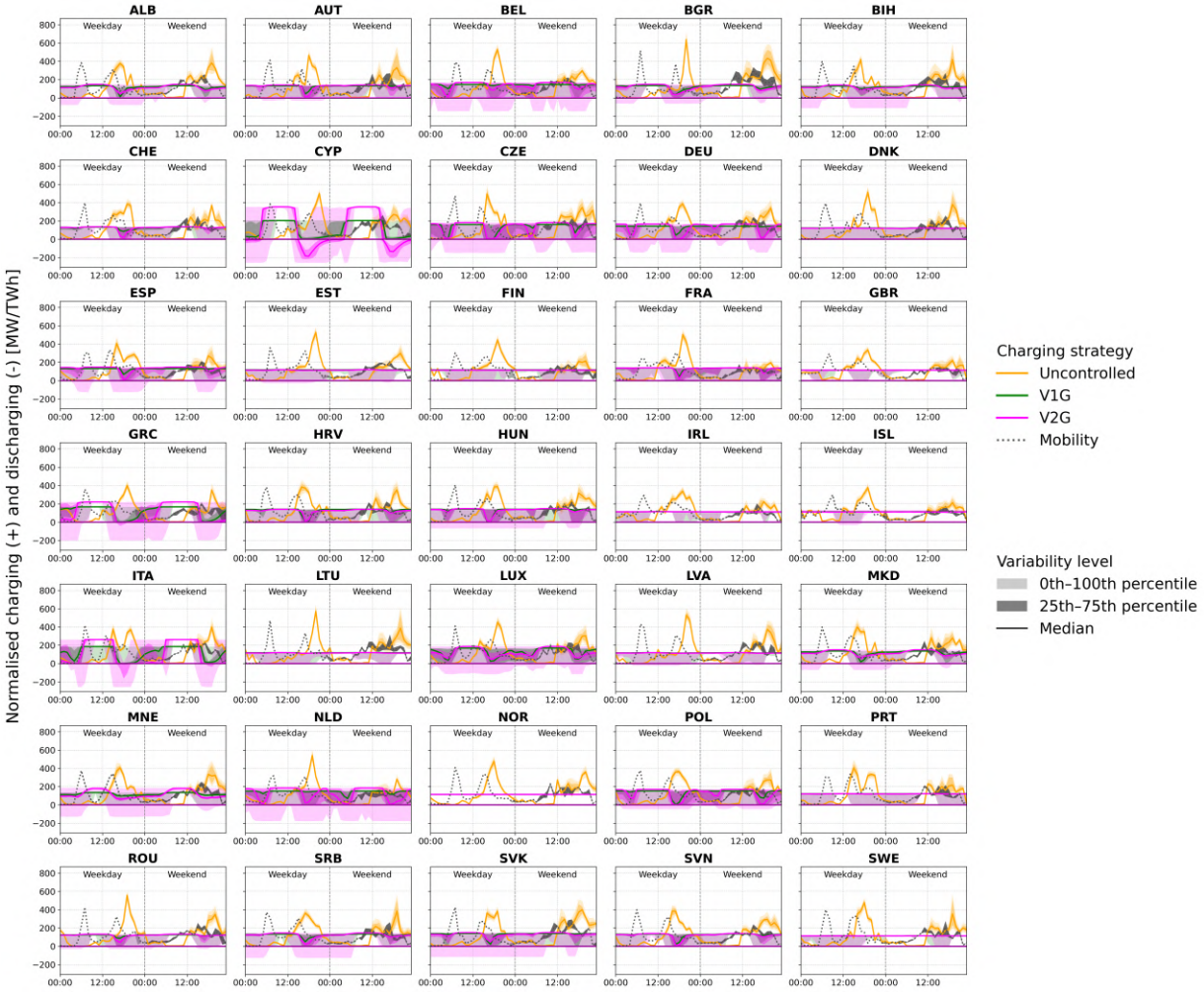
补充图 4：采用 Shapley 分解分析进行容量部署敏感性检验。该图展示了成本基准情景下容量部署的变化。(a,d,g) 无序充电情景，报告各行业或子行业的容量组合构成；(b,e,h) 与参考情景相比，容量部署的相对变化；(c,f,i) Shapley 分解评估容量变化的主要驱动因素。



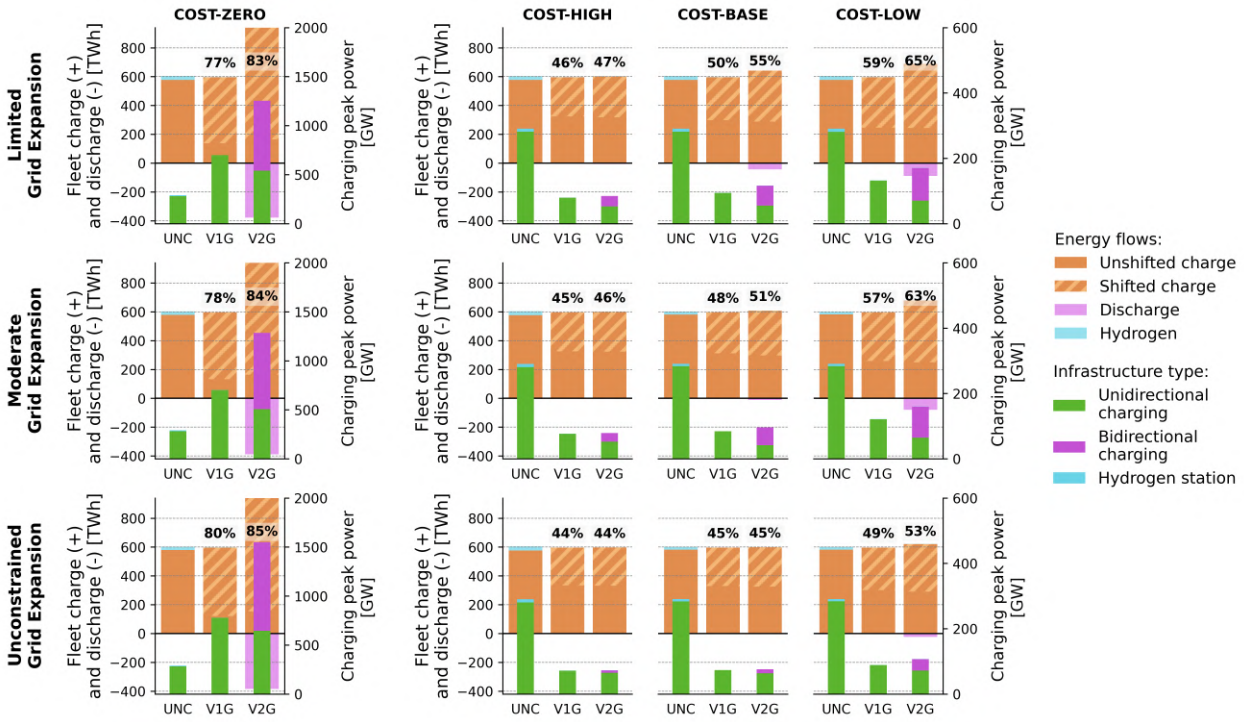
补充图5：使用Shapley分解分析进行供需流敏感性检验。该图展示了成本基准情景下电力流供需的变化。（a、d、g）无序充电情景，报告电力部门供需构成；（b、e、h）与参考情景相比的电力流相对变化；（c、f、i）Shapley分解评估容量变化的主要驱动因素。



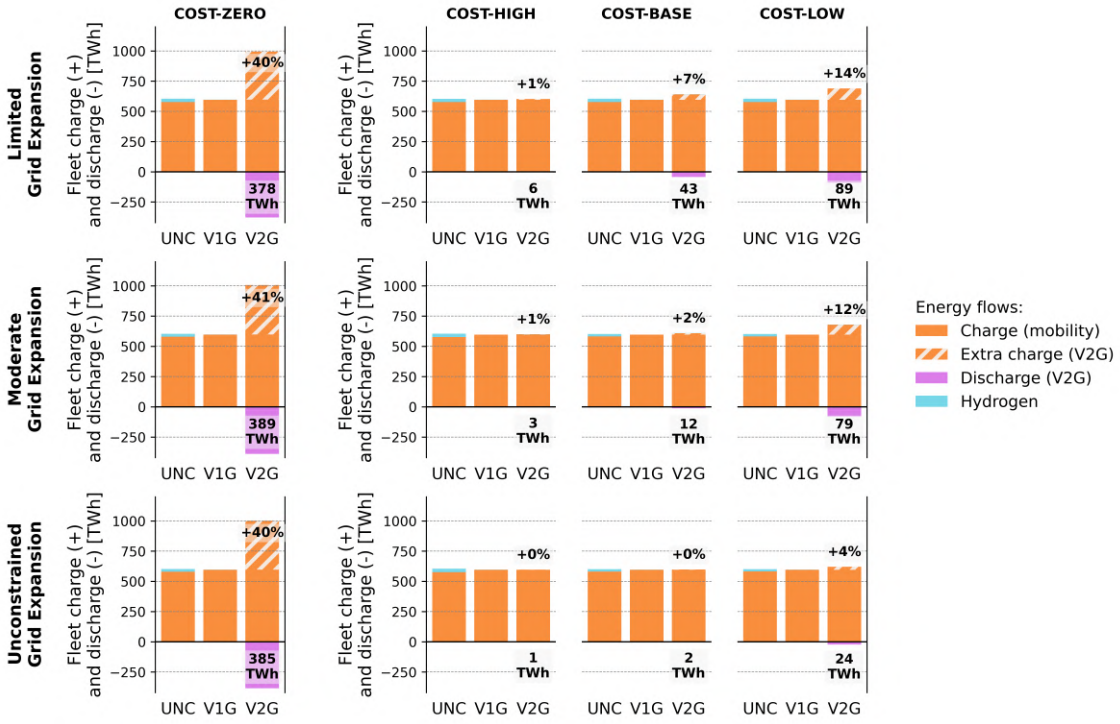
补充图 6：零成本、中度电网扩建情景下每小时充电与出行时间序列。阴影区域表示各充电方案（无序充电、V1G 和车辆到电网）的数值分布百分位数，并以不同颜色显示。曲线按工作日和周末汇总。



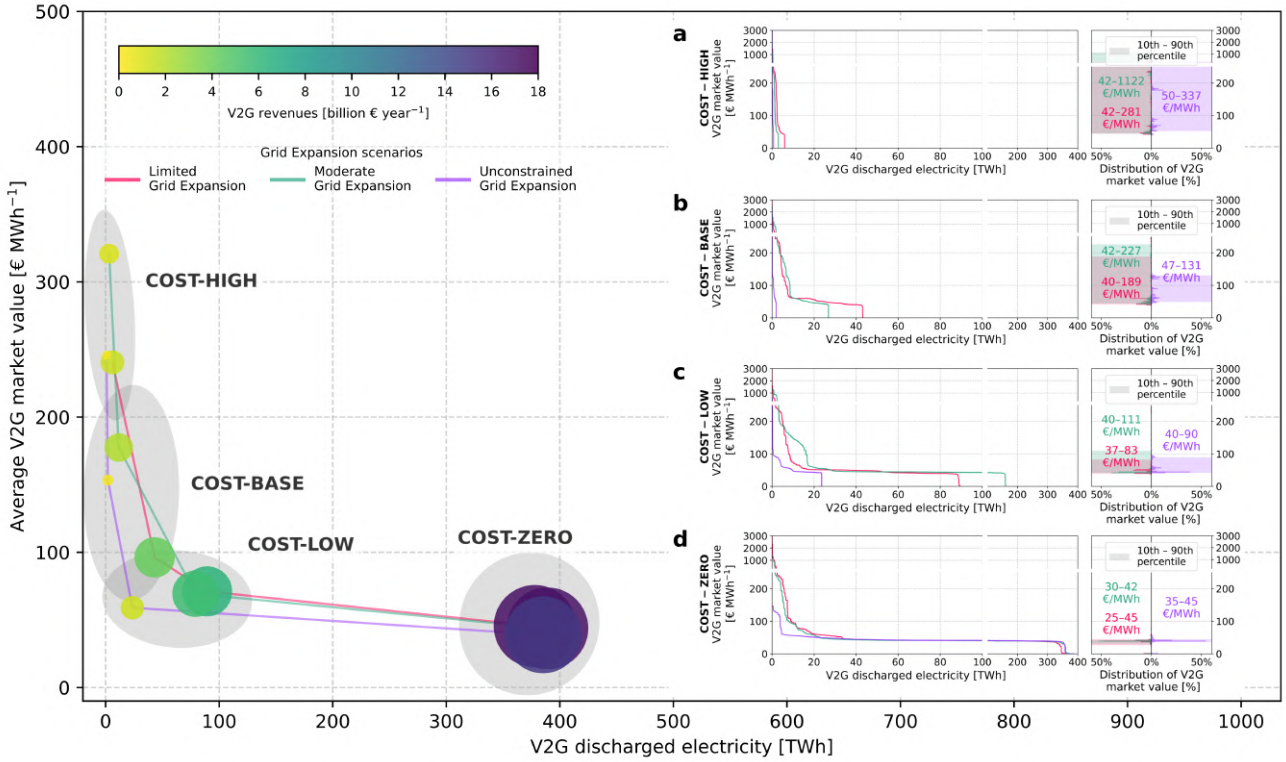
补充图7：基准成本、适度电网扩建情景下每小时充电与出行时间序列。阴影区域表示各充电方案（无序充电、V1G 和车辆到电网）的数值分布范围，不同颜色对应不同方案。曲线按工作日和周末分别汇总。



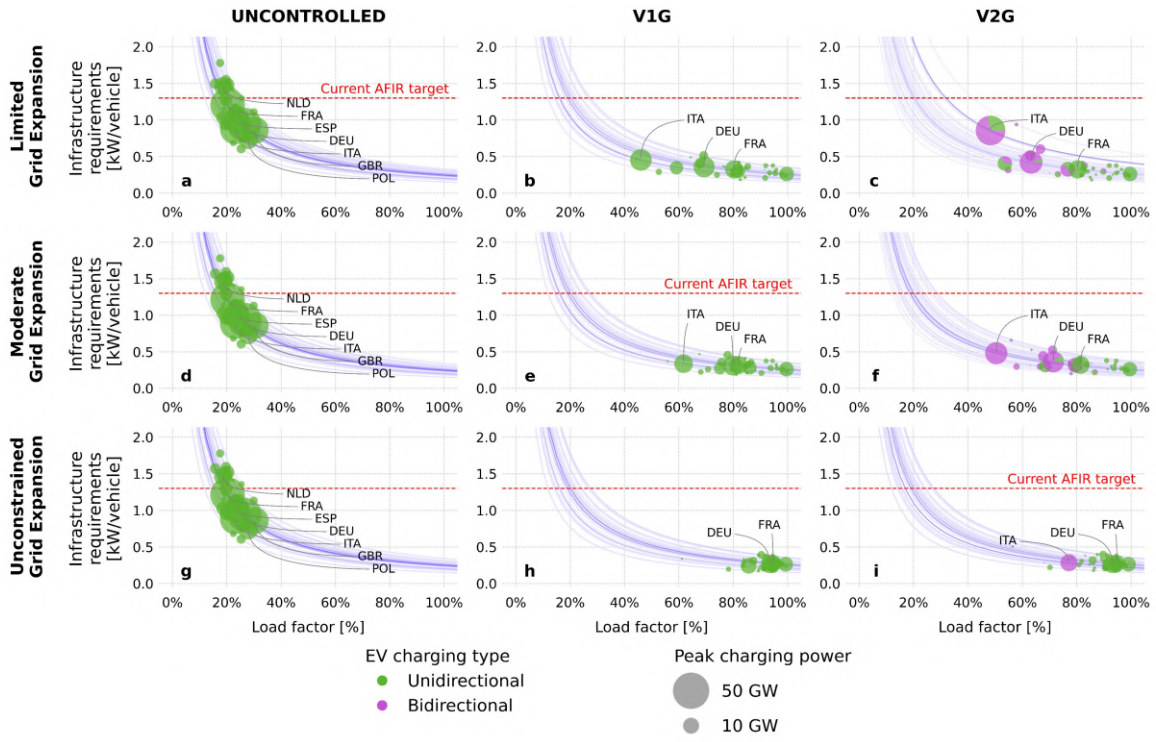
补充图8：车队充放电与充电峰值功率容量。图中左侧纵轴显示乘用车车队的充放电流量，涵盖所有类型的动力系统。阴影区域表示相对于无序充电情景转移的充电量。右侧纵轴显示按充电基础设施类型划分的总充电功率峰值：单向或双向。标注表示用于电动汽车充电的转移电量。



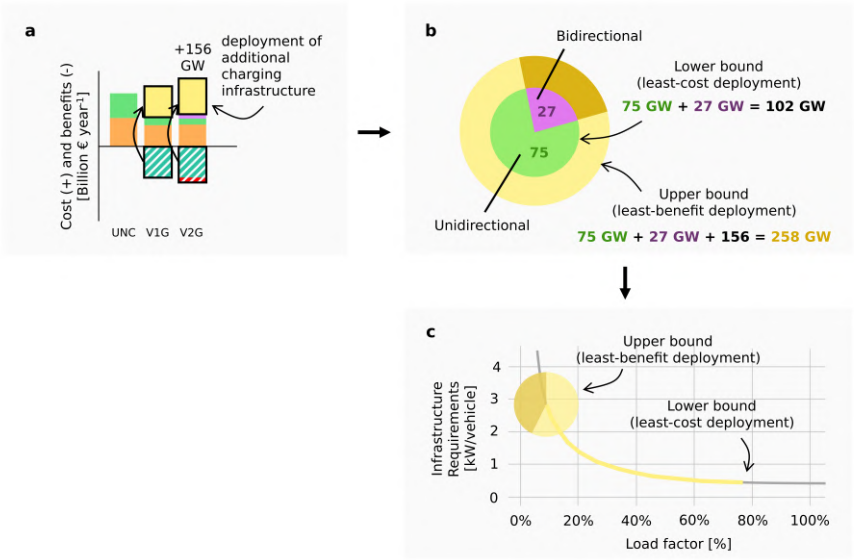
补充图9：车队充放电，以及支持车辆到电网运行所需的充电量。图中左侧纵轴显示乘用车车队的充放电流量，涵盖所有类型的动力系统。阴影区域表示除出行所用电力外，为支持后续阶段的V2G放电所需的额外充电量。标注表示支持V2G放电所需的充电量，以及满足出行需求所需的电量。



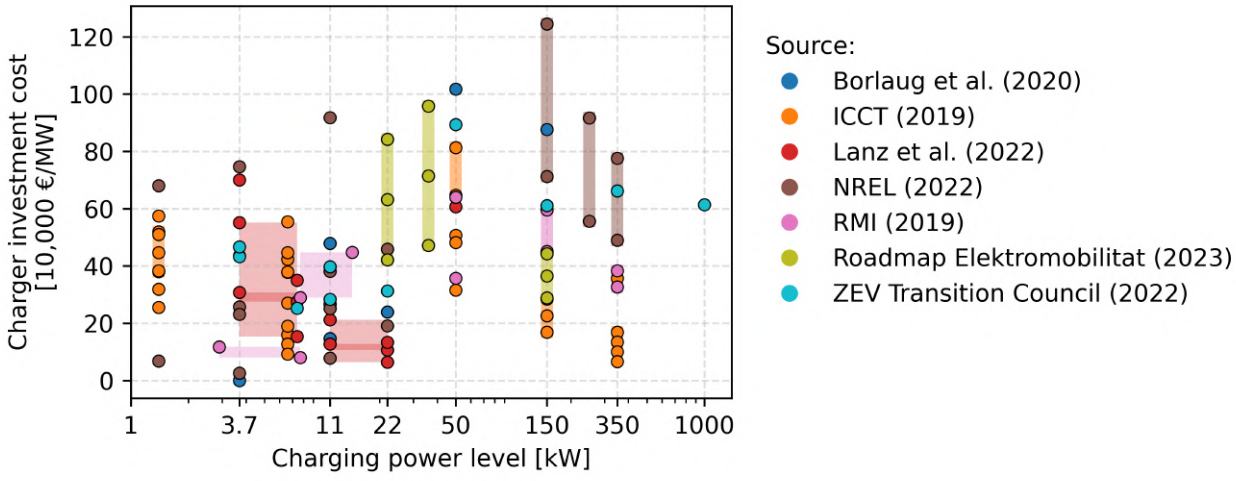
补充图10：V2G收益与市场报酬。主图展示了车网互动部署的潜在收益，其横轴为放电量（注入电网的电力），纵轴为平均车辆到电网市场价值。圆形标记的大小和颜色表示车辆到电网运行的总收益，该收益根据电池放电并向电网注入电力时对应时间步的影子价格计算得出。彩色线条连接不同充电基础设施成本情景下相同的电网扩建情景。面板 (a–d) 展示两个子图：左侧为各国的车辆到电网市场价值随每小时注入量变化的情况；右侧为基于车辆到电网注入量的车辆到电网市场价值加权分布。



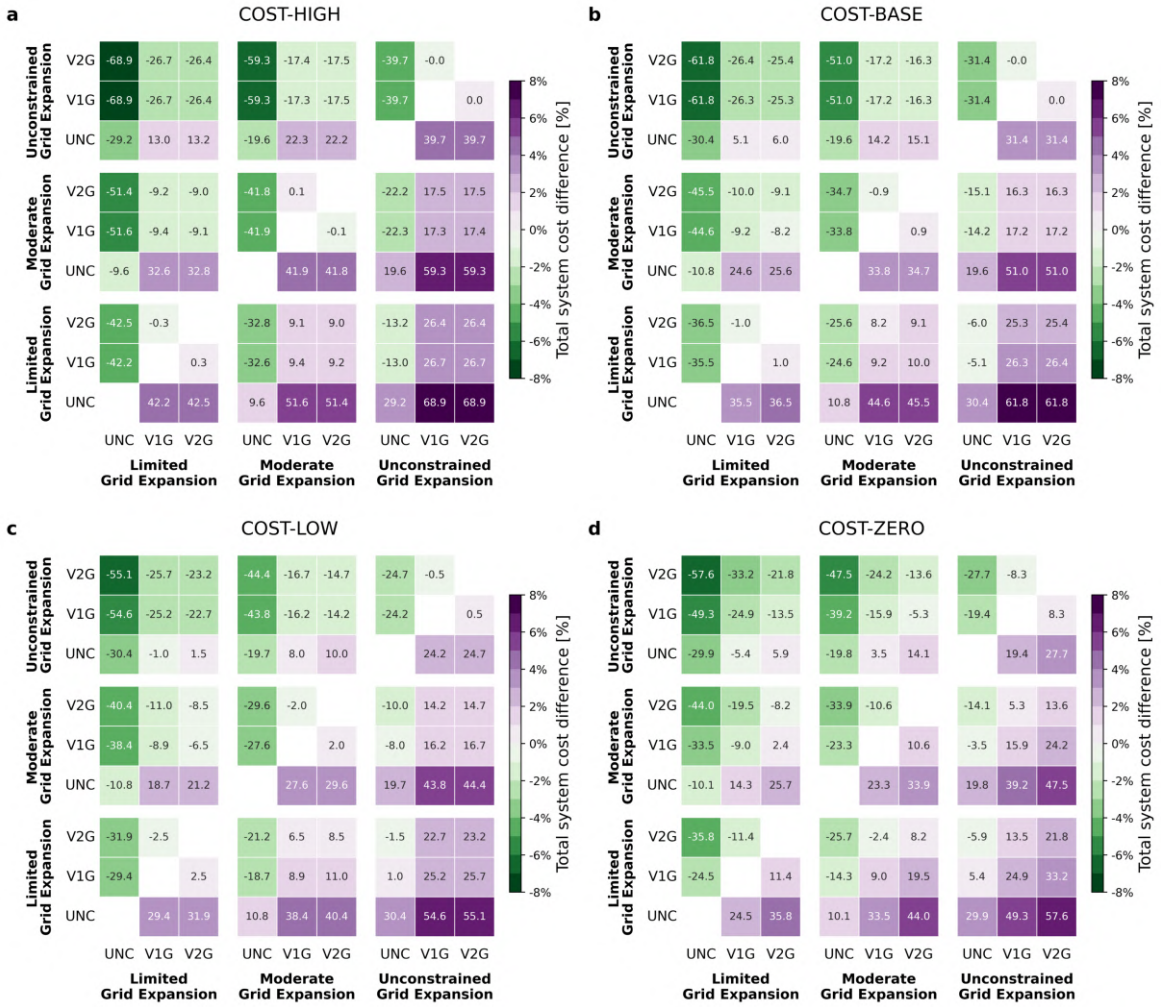
补充图 11：充电基础设施需求与负荷率的关系。该图以饼图展示了不同国家乘用电动汽车车队的充电基础设施需求。每个饼图扇区表示一种充电基础设施类型，区分单向（绿色）和双向（洋红色）充电。蓝色曲线表示充电基础设施需求与负荷率之间的理论关系，该关系取决于单车出行需求对应的充电需求以及车辆到电网注入。单车出行能耗相同的国家共用同一条曲线。启用车辆到电网后，曲线向右上方移动，从而在充电基础设施需求不变的情况下实现更高的负荷率。充电基础设施需求根据各国的充电峰值需求和车辆数量计算。



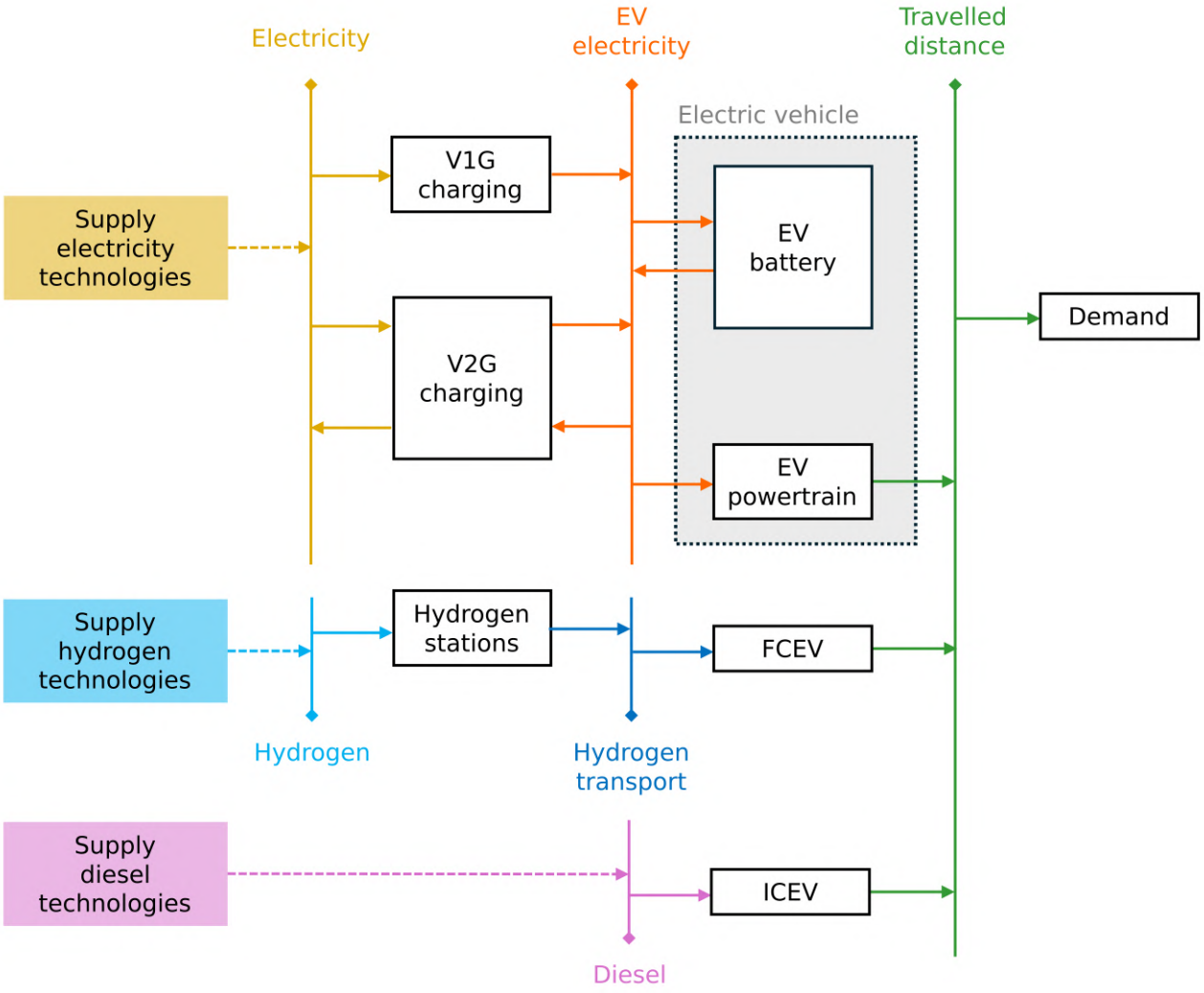
补充图12：计算充电基础设施最大成本中性部署的方法。 该图说明了用于计算充电基础设施部署上限的步骤，该上限称为最大成本中性部署。这表示在假设单向与双向充电器组合相同的前提下，相对于无控制情景不再产生额外系统总成本节约的充电基础设施最高部署水平。（a）计算V1G和V2G情景相对于无控制情景的系统效益（或成本节约）。节约为负（即产生额外成本）的国家被设为零，并按初始成本节约数值按比例重新分配系统总成本节约。（b）计算在保持单向与双向充电基础设施占比不变的情况下可部署的等效额外充电基础设施。下限表示由能源系统模型得到的成本最优结果。（c）基于上限（最大成本中性部署）计算充电基础设施需求，随后在相应的国家特定曲线上进行插值。



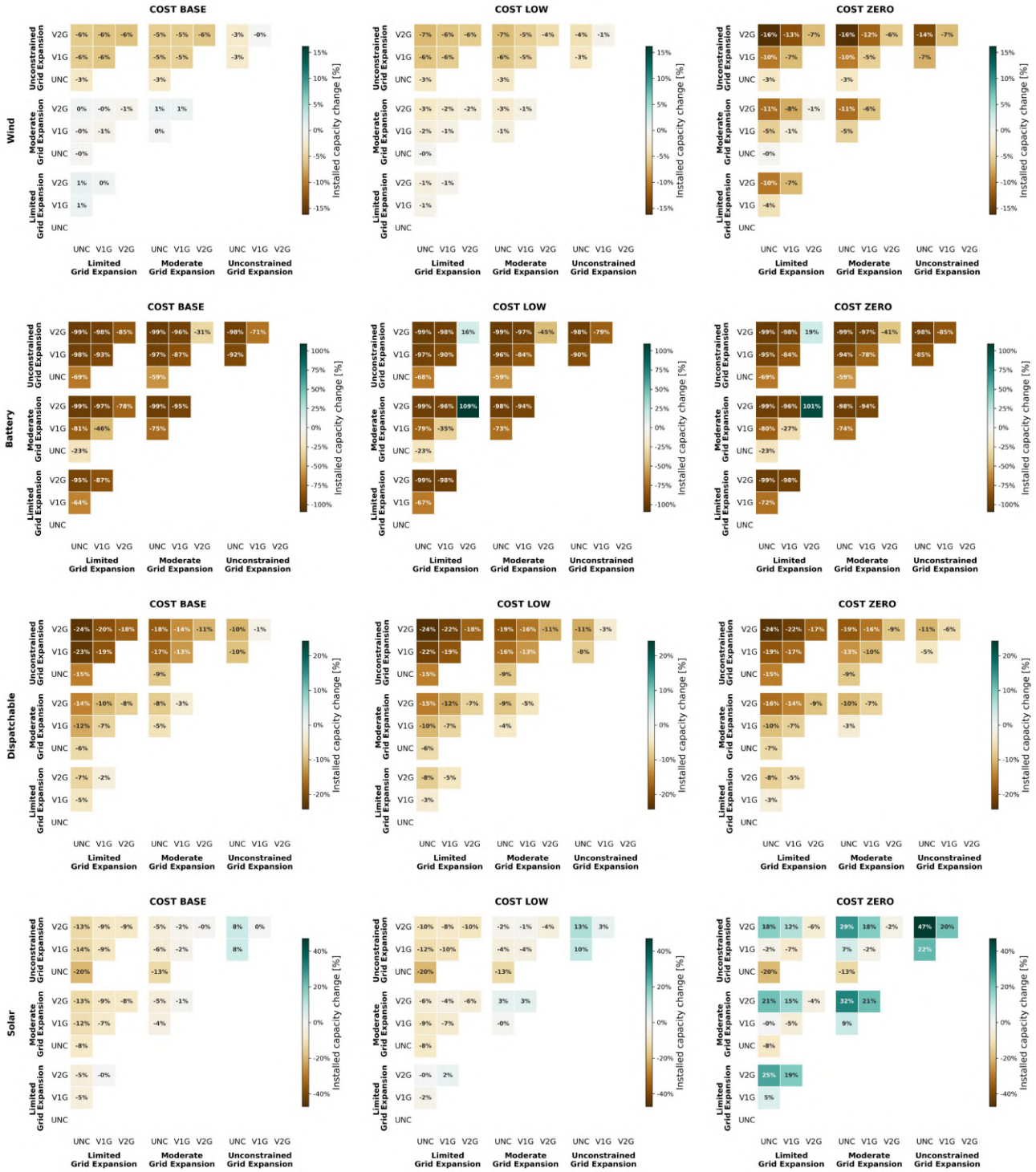
补充图13：充电基础设施投资成本估算。



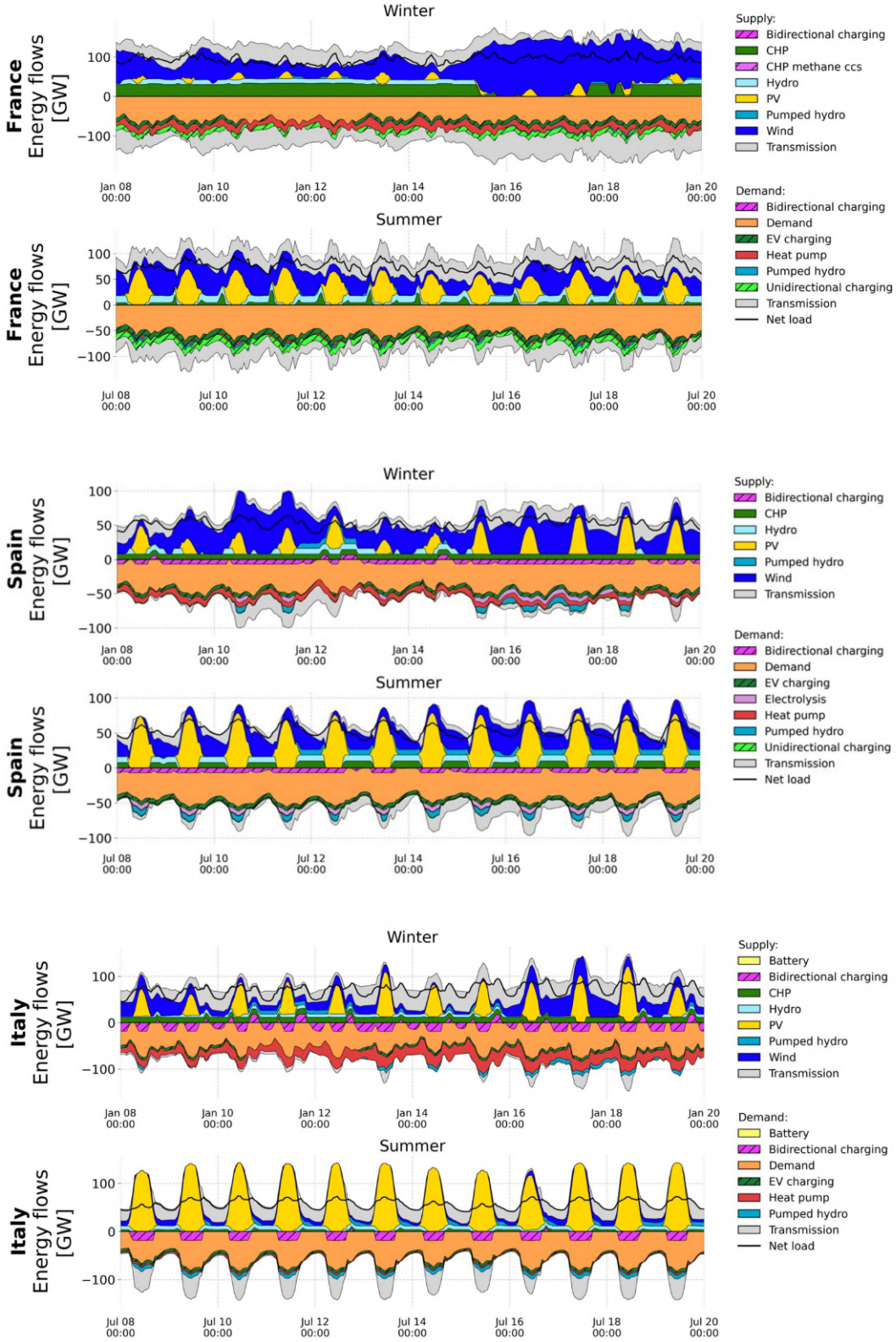
补充图14：系统总成本节约。 数值表示能源系统成本节约的绝对值，以十亿欧元/年$^{-1}$表示。以百分比表示的系统总成本差异不包括车辆投资和运营成本，以确保与未计入车辆成本的既往研究具有可比性。



补充图15：能源系统模型中电动汽车和充电基础设施表示方式的示意图。



补充图16：装机容量相对变化。该图显示了相对于参考情景的已部署容量相对变化，具体定义见双向热图的行和列。其正负号与从横轴上的情景切换到纵轴上的情景时发生的变化一致。



补充图17：车辆到电网—基准成本—适度电网扩建情景下三个欧洲国家的逐小时调度。

补充表

263

补充表1：对 V1G 和车辆到电网充电基础设施成本进行的敏感性分析。测试情景：V2G-中度电网扩建。

充电基础设施成本情景	单向充电 (GW)	双向充电 (GW)	总计充电 (GW)	V2G 占比 [%]	V2G 放电 [太瓦时]
基准成本	82	109	191	57	12
基准成本（V1G 成本 =车辆到电网成本）	9	192	200	96	15
基准成本（光伏成本降低 50%）	97	65	162	40	99
低成本	129	189	318	60	79
低成本（V1G 成本 =车辆到电网成本）	21	305	325	94	82
低成本（光伏成本降低 50%）	139	159	298	53	307

补充表2： 2050年交通投资与运营成本。乘用车和轻型车辆的数值取自Burke 等人(2024年)，重型车辆和公交车的数据取自丹麦能源署（L1和B1型）（丹麦能源署，2024年），摩托车则采用我们自行设定的假设。

车辆类型	参数	Unit	FCEV	EV	ICEV
乘用车	投资	2015年欧元/辆	20210	19832	18232
	可变运维成本	2015年欧元/公里	0.021	0.008	0.027
	固定运维成本	2015年欧元/辆/年	0.0	0.0	0.0
	使用寿命	年	12	12	12
	能耗	千瓦时/公里	0.252	0.180	0.375
轻型车辆 车辆	投资	2015年欧元/辆	27360	24249	24424
	可变运维成本	2015年欧元/公里	0.021	0.008	0.027
	固定运维成本	2015年欧元/辆/年	0.0	0.0	0.0
	使用寿命	年	12	12	12
	能耗	千瓦时/公里	0.378	0.270	0.481
公交车	投资	2015年欧元/辆	201632	201632	159507
	可变运维成本	2015年欧元/公里	0.1036	0.1036	0.1130
	固定运维成本	2015年欧元/辆/年	6026.24	6026.24	6779.52
	使用寿命	年	13	13	13
	能耗	千瓦时/公里	2.266	1.620	3.021
摩托车	投资	2015年欧元/辆	-	12900	15000
	可变运维成本	2015年欧元/公里	-	0.0	0.0
	固定运维成本	2015年欧元/辆/年	-	0.0	0.0
	使用寿命	年	-	10	10
	能耗	千瓦时/公里	-	0.072	0.151
重型车辆 车辆	投资	2015年欧元/辆	218343	188465	199468
	可变运维成本	2015年欧元/公里	0.1008	0.1008	0.1130
	固定运维成本	2015年欧元/辆/年	6026	6026	6780
	使用寿命	年	14	14	14
	能耗	千瓦时/公里	2.517	1.800	2.849

补充表3：不同敏感性情景和充电器类型下的充电基础设施成本假设。

成本情景	基础设施	成本类型	Unit	数值
High	单向	投资	10'000 EUR_{2015}/MW	84.273
		固定运维	10'000 欧元$_{2015}$/MW/年	1.873
	双向	投资	10'000 欧元$_{2015}$/MW	94.795
		固定运维	10'000 欧元$_{2015}$/MW/年	1.873
Base	单向	投资	10'000 欧元$_{2015}$/MW	63.205
		固定运维	10'000 欧元$_{2015}$/MW/年	1.346
	双向	投资	10'000 欧元$_{2015}$/MW	69.518
		固定运维	10'000 欧元$_{2015}$/MW/年	1.346
Low	单向	投资	10'000 欧元$_{2015}$/MW	42.136
		固定运维	10'000 欧元$_{2015}$/MW/年	0.819
	双向	投资	10'000 EUR_{2015}/MW	44.241
		固定运维	10'000 欧元$_{2015}$/MW/年	0.819
Zero	单向	投资	10'000 欧元$_{2015}$/MW	0.0
		固定运维	10'000 欧元$_{2015}$/MW/年	0.0
	双向	投资	10'000 欧元$_{2015}$/MW	0.0
		固定运维	10'000 欧元$_{2015}$/MW/年	0.0

补充表4： 2050年各国及交通运输类别的估算电池容量（太瓦时）。我们假设乘用车的电池容量为80千瓦时，轻型车辆为150千瓦时，摩托车为15千瓦时，公交车为500千瓦时，重型车辆为1000千瓦时。

国家	轻型车辆	重型车辆	乘用车	摩托车	Bus	总计
AUT	0.0634	0.0536	0.3983	0.0080	0.0050	0.5284
ALB	0.0090	0.0109	0.0368	0.0004	0.0036	0.0606
BEL	0.1139	0.0967	0.4683	0.0074	0.0081	0.6943
BGR	0.0523	0.0385	0.2219	0.0017	0.0104	0.3248
CHE	0.0562	0.0422	0.3733	0.0111	0.0072	0.4900
CYP	0.0148	0.0105	0.0441	0.0004	0.0015	0.0713
CZE	0.0662	0.2650	0.4598	0.0170	0.0110	0.8200
DEU	0.3922	0.5318	3.7677	0.0643	0.0403	4.7962
DNK	0.0584	0.0281	0.2076	0.0024	0.0066	0.3021
ESP	0.5200	0.3517	2.0243	0.0528	0.0328	2.9816
EST	0.0125	0.0261	0.0597	0.0005	0.0025	0.1013
FIN	0.0698	0.1559	0.2776	0.0041	0.0092	0.5166
FRA	0.0729	0.3063	3.0583	0.0331	0.0454	3.5160
GBR	0.0600	0.3649	2.5213	0.0179	0.0775	3.0416
GRC	0.1727	0.2083	0.4222	0.0237	0.0134	0.8402
HRV	0.0206	0.0321	0.1333	0.0011	0.0029	0.1890
HUN	0.0667	0.0490	0.2913	0.0026	0.0096	0.4193
IRL	0.0477	0.0235	0.1746	0.0006	0.0063	0.2527
ISL	0.0042	0.0125	0.0214	0.0002	0.0016	0.0398
ITA	0.5327	0.5735	3.1215	0.1017	0.0500	4.3794
LTU	0.0097	0.0254	0.1144	0.0005	0.0040	0.1539
LUX	0.0052	0.0053	0.0332	0.0004	0.0010	0.0452
LVA	0.0086	0.0173	0.0566	0.0004	0.0024	0.0853
MNE	0.0020	0.0027	0.0165	0.0001	0.0007	0.0221
MKD	0.0047	0.0057	0.0332	0.0002	0.0016	0.0454
NLD	0.1355	0.0617	0.6756	0.0097	0.0048	0.8862
NOR	0.0737	0.0644	0.2204	0.0029	0.0078	0.3692
POL	0.3974	0.6890	1.5929	0.0225	0.0450	2.7468
PRT	0.1901	0.0519	0.4226	0.0067	0.0077	0.6790
ROU	0.1130	0.1424	0.5160	0.0019	0.0259	0.7993
SRB	0.0291	0.0351	0.1600	0.0006	0.0049	0.2297
SWE	0.0855	0.0706	0.3896	0.0045	0.0072	0.5574
SVN	0.0140	0.0169	0.0915	0.0011	0.0014	0.1249
SVK	0.0373	0.0450	0.1857	0.0017	0.0047	0.2744
BIH	0.0087	0.0213	0.0735	0.0002	0.0026	0.1062

补充表5： 各车辆类别和国家的行驶总距离。计量单位：车辆公里 [Mvkm]

国家	轻型车辆	重型车辆	乘用车	摩托车	公交车
ALB	1501	496	6015	112	232
AUT	6677	4057	72129	1493	572
BEL	12736	3842	97227	1882	658
BGR	3387	1429	32491	621	530
BIH	2116	693	9459	197	331
CHE	5707	2099	60099	4486	350
CYP	1679	87	5339	123	211
CZE	8664	5111	50061	1597	842
DEU	32930	41789	549744	11118	3615
DNK	7775	2257	42058	683	828
ESP	33921	17898	291331	16358	1958
EST	970	310	8292	63	223
FIN	7745	2124	42650	1051	726
FRA	123951	21220	468277	18159	3845
GBR	79092	20111	386423	4371	2347
GRC	10799	2468	37966	6904	946
HRV	1910	1018	22730	202	382
HUN	7412	2758	34978	478	898
IRL	5835	2145	36461	96	492
ITA	59508	9733	381739	30650	4636
LTU	1095	915	20935	101	108
LUX	607	217	6164	64	63
LVA	1136	626	9374	70	164
MKD	1136	371	5505	109	177
MLT	559	156	3009	45	106
MNE	432	142	1860	37	67
NLD	20411	6289	107549	4639	711
NOR	5639	2079	30214	259	653
POL	43219	25551	191785	3077	3124
PRT	12947	2015	64903	1480	409
ROU	11516	1626	57706	560	2855
SRB	3518	1127	17151	468	547
SVK	3593	2723	16719	101	412
SVN	1576	881	18501	227	154
SWE	6740	3229	57890	560	719

补充表6：各国家的车辆数量（车辆数量）。来源：Mantzos 等人（2018年）

国家	轻型车辆	重型车辆	乘用车	摩托车	公交车
AUT	422,745	53,582	4,978,852	536,964	10,037
ALB	60,036	10,864	460,027	24,498	7,146
BEL	759,406	96,690	5,853,782	490,495	16,125
BGR	348,667	38,519	2,773,325	112,388	20,818
CHE	374,819	42,174	4,666,278	739,344	14,395
CYP	98,533	10,511	550,695	28,183	3,084
CZE	441,303	264,959	5,747,913	1,132,085	22,027
DEU	2,616,118	531,849	47,095,784	4,284,918	80,519
DNK	389,461	28,124	2,594,482	160,823	13,158
ESP	3,466,479	351,702	25,304,190	3,520,005	65,599
EST	83,313	26,102	746,464	34,629	5,026
FIN	465,024	155,868	3,470,507	272,168	18,467
FRA	4,854,678	306,298	38,229,305	2,205,578	90,807
GBR	4,003,781	364,877	31,517,597	1,193,841	154,990
GRC	1,151,020	208,280	5,282,695	1,583,491	26,743
HRV	137,049	32,126	1,666,413	73,997	5,877
HUN	444,588	49,017	3,641,823	176,070	19,134
IRL	317,798	23,526	2,182,920	38,260	12,500
ISL	28,065	12,484	267,467	10,832	3,146
ITA	3,556,816	573,475	39,018,170	6,780,733	100,042
LTU	64,345	25,409	1,430,520	33,666	7,925
LUX	34,833	5,348	415,145	24,054	2,042
LVA	57,146	17,283	707,841	23,713	4,885
MNE	13,440	2,718	206,453	5,655	1,459
MKD	31,339	5,671	415,062	13,343	3,201
NLD	903,005	61,652	8,442,982	646,046	9,513
NOR	491,649	64,365	2,751,949	192,536	15,634
POL	2,649,198	688,968	19,911,107	1,502,888	89,905
PRT	1,267,647	51,908	5,282,970	447,876	15,493
ROU	753,029	142,414	6,452,536	129,657	51,802
SRB	193,827	35,073	1,999,771	40,695	9,880
SWE	570,252	70,617	4,869,979	300,356	14,377
SVN	93,484	16,916	1,143,150	67,145	2,834
SVK	248,873	45,034	2,321,608	110,141	9,363
BIH	57,805	21,268	919,226	10,552	5,212

补充表7：2050年各国家和交通运输类别的估算电池容量（太瓦时）。我们假设乘用车的电池容量为80千瓦时，轻型车辆为150千瓦时，摩托车为15千瓦时，公交车为500千瓦时，重型车辆为1000千瓦时。

国家	轻型车辆	重型车辆	乘用车	摩托车	Bus	总计
AUT	0.0634	0.0536	0.3983	0.0080	0.0050	0.5284
ALB	0.0090	0.0109	0.0368	0.0004	0.0036	0.0606
BEL	0.1139	0.0967	0.4683	0.0074	0.0081	0.6943
BGR	0.0523	0.0385	0.2219	0.0017	0.0104	0.3248
CHE	0.0562	0.0422	0.3733	0.0111	0.0072	0.4900
CYP	0.0148	0.0105	0.0441	0.0004	0.0015	0.0713
CZE	0.0662	0.2650	0.4598	0.0170	0.0110	0.8200
DEU	0.3922	0.5318	3.7677	0.0643	0.0403	4.7962
DNK	0.0584	0.0281	0.2076	0.0024	0.0066	0.3021
ESP	0.5200	0.3517	2.0243	0.0528	0.0328	2.9816
EST	0.0125	0.0261	0.0597	0.0005	0.0025	0.1013
FIN	0.0698	0.1559	0.2776	0.0041	0.0092	0.5166
FRA	0.0729	0.3063	3.0583	0.0331	0.0454	3.5160
GBR	0.0600	0.3649	2.5213	0.0179	0.0775	3.0416
GRC	0.1727	0.2083	0.4222	0.0237	0.0134	0.8402
HRV	0.0206	0.0321	0.1333	0.0011	0.0029	0.1890
HUN	0.0667	0.0490	0.2913	0.0026	0.0096	0.4193
IRL	0.0477	0.0235	0.1746	0.0006	0.0063	0.2527
ISL	0.0042	0.0125	0.0214	0.0002	0.0016	0.0398
ITA	0.5327	0.5735	3.1215	0.1017	0.0500	4.3794
LTU	0.0097	0.0254	0.1144	0.0005	0.0040	0.1539
LUX	0.0052	0.0053	0.0332	0.0004	0.0010	0.0452
LVA	0.0086	0.0173	0.0566	0.0004	0.0024	0.0853
MNE	0.0020	0.0027	0.0165	0.0001	0.0007	0.0221
MKD	0.0047	0.0057	0.0332	0.0002	0.0016	0.0454
NLD	0.1355	0.0617	0.6756	0.0097	0.0048	0.8862
NOR	0.0737	0.0644	0.2204	0.0029	0.0078	0.3692
POL	0.3974	0.6890	1.5929	0.0225	0.0450	2.7468
PRT	0.1901	0.0519	0.4226	0.0067	0.0077	0.6790
ROU	0.1130	0.1424	0.5160	0.0019	0.0259	0.7993
SRB	0.0291	0.0351	0.1600	0.0006	0.0049	0.2297
SWE	0.0855	0.0706	0.3896	0.0045	0.0072	0.5574
SVN	0.0140	0.0169	0.0915	0.0011	0.0014	0.1249
SVK	0.0373	0.0450	0.1857	0.0017	0.0047	0.2744
BIH	0.0087	0.0213	0.0735	0.0002	0.0026	0.1062

参考文献

Burke, A. F., Zhao, J., and Fulton, L. M. (2024). 轻型车辆电池驱动电动汽车和燃料电池汽车的成本预测（2020–2040年）及相关经济问题。《交通运输经济学研究》经济学，105：101440。

丹麦能源署（2024）。商用货运和客运交通技术目录。访问日期：2025-09-24。

Herbst,I., Barth,J.,Daneshgar, G., Furrer,R.,Heer,L.,Hickethier,M.,Mathis,U.,Rosser, S., Trottmann, M., Vischer, M., Wahl, H., and Walter, S. (2023). 社区充电：电动出行信息汇编¨适用于¨各市镇。https://pubdb.bfe.admin.ch/ de/publication/download/12068。PDF 可¨通过以下链接获取： https://pubdb.bfe.admin.ch/de/ publication/download/12068。

Lombardi, F., vanGreevenbroek, K., Grochowicz, A., Lau, M., Neumann, F., Patankar, N., and V˚ager¨o, O. (2025). 运用生成备选方案的建模方法，灵活探索切实可行的优选能源规划策略。《焦耳》《焦耳》，9(11)。出版商：爱思唯尔。Mantzos, L., Rozsai, M., Matei, N. A., Mulholland, E., Tamba, M., and Wiesenthal, T. (2018)。JRC-IDEES 2015。Pasaoglu, G., Fiorello, D., Martino, A., Scarcella, G., Alemanno, A., Zubaryeva, A., andThiel, C. (2012)。欧洲汽车驾驶员的驾驶和停车模式：一项出行调查。JRC科学与政策报告JRC77079，EUR 25627 EN，联合研究中心，欧盟委员会，佩滕，荷兰／卢森堡。Schwarzer, C. M. (2025)。双向充电：电动汽车如何（终于）赚钱。访问日期：2026-01-20。Wood, E., Borlaug, B., Moniot, M., Lee, D.-Y., Ge, Y., Yang, F., and Liu, Z. (2023)。2030年国家充电网络：估算美国轻型车辆电动汽车充电需求。技术报告NREL/TP-5400-85654，美国国家可再生能源实验室。