固定式和移动式电动汽车充电站公平部署的两阶段随机优化模型

Hamid Najafzad [a]、Moddassir Khan Nayeem [a]、Fuhad Ahmed Opu [a]、Omar Abbaas [a*]和 Gabriel Nicolosi [b]

[a] 德克萨斯大学圣安东尼奥分校机械、航空航天与工业工程系，美国得克萨斯州圣安东尼奥市 78249

[b] 密苏里科技大学工程管理与系统工程系，美国密苏里州罗拉市

摘要

电动汽车（EV）的广泛普及面临的一大障碍，是缺乏可靠且公平的充电基础设施。充电站选址不当会造成覆盖缺口，减缓电动汽车普及，尤其影响服务不足的社区。本文提出一种两阶段随机混合整数规划模型，用于在多个区域和时段内优化固定充电站（FCS）和移动充电站（MCS）的布局。首先，采用精确的连续选址方法——单加油站边缘扫描算法（ESS），确定候选位置的有限支配集。我们对 ESS 算法进行改进，将现有公共充电站纳入考量，从而避免重复覆盖。在模型第一阶段，根据长期交通模式、预算约束和社会经济因素分配固定充电站，以确保稳定的基准覆盖。第二阶段则动态分配移动充电站，以应对短期需求波动和不确定性，目标是在最大限度扩大覆盖范围的同时，尽可能降低重新部署成本。我们采用基于情景的框架来刻画需求变异性。针对现实网络开展的数值实验表明，该模型能够增强系统韧性并减少未满足需求。这些发现为规划人员和政策制定者提供了切实可行的见解，助其建设便捷且能够响应需求的电动汽车充电基础设施。

关键词：电动汽车充电网络、固定式充电站、移动充电站、改进的边缘扫描算法、两阶段随机优化框架

(*) 通讯作者，电子邮箱：omar.abbaas@utsa.edu。

1. 引言

交通运输部门是碳排放和空气污染的主要来源之一。根据《2022年美国温室气体排放与汇清单》，交通运输约占美国温室气体总排放量的 28%，在所有部门中占比最高 [1-3]。为此，许多国家出台了严格的减排政策。为实现《巴黎协定》将全球变暖控制在远低于 2 °C 的目标，这些政策加速了全球向电动汽车（EV）转型的进程，并将其作为交通运输脱碳的一项关键策略 [2, 4, 5]。

近年来，电动汽车普及迅速发展，2023年全球电动汽车销量约达1,400万辆，使电动汽车保有量增至近4,000万辆，占新车总销量的18% [6]。这一增长在中国、欧洲和美国最为显著，这三个市场的销量合计约占全球电动汽车销量的90%。尽管市场不断扩大，电动汽车渗透率仍集中在这些发达市场，这凸显了在国际和区域层面加大力度、提升可达性并完善配套基础设施的必要性。预计在现行政策下，道路运输全面电气化到2035年可减少约20亿吨二氧化碳当量排放，即使计入发电带来的额外排放也是如此 [6]。2022年，中国电动乘用车贡献了全球道路运输排放降幅的约35%，体现了早期大规模普及电动汽车所产生的显著气候效益 [6]。尽管取得了这些令人鼓舞的成果，这一转型能否成功仍取决于可靠且便捷的充电基础设施是否充足 [7]。早期采用者主要依赖家庭充电，但要推动电动汽车进入大众市场，就需要建设完善的公共充电网络，确保所有驾驶者都能便捷地使用充电设施。

预计到2035年，公共充电能力将增长近六倍，支持电动汽车在主要城市中心以外的大规模普及，而过去充电设施大多集中在这些城市中心。根据国际能源署（IEA）的数据，公共充电桩将从2023年的约400万个增加到2035 [6]年的约2500万个。在同一时段，私人充电桩将从约3600万个增至超过4.3亿个[6]。大功率公共充电桩的扩建对于缓解里程焦虑至关重要。里程焦虑是指驾驶员担心在到达充电站之前电量耗尽。这类基础设施对于实现长途出行、确保电动汽车普及对所有驾驶员而言都是切实可行的选择至关重要[6]。虽然预计公共充电站数量将大幅增长，但目前的分布仍极不均衡，主要集中在大都市中心和主要交通走廊沿线，而农村和低密度地区的供应有限[8]。

这种不平衡在现实系统中十分明显。图1 展示了得克萨斯州贝克萨尔县大功率公共电动汽车充电站的分布，充电桩主要集中在中部和北部地区，而南部及外围地区仍然服务不足。这一例子表明，不均衡的基础设施

部署可能造成接入缺口并加剧空间不平等，凸显了进行战略性、数据驱动规划的必要性。

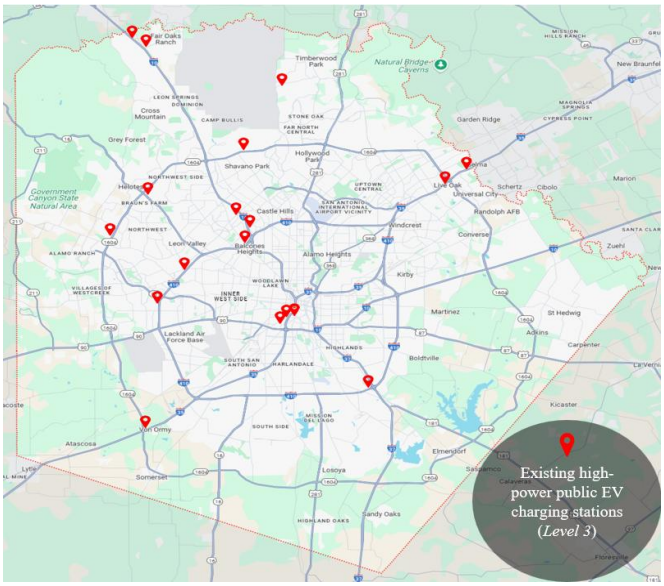

图1：美国得克萨斯州贝克萨尔县电动汽车充电站的当前分布

扩展电动汽车充电网络，需要政策制定者和行业领袖进行战略规划，以确定在国家、区域和城市层面部署的最佳位置、规模和范围[9]。此外，妥善管理电池充电资源并持续投资交通基础设施，对于应对不断增长的电动汽车充电需求、确保系统性能可靠至关重要 [10]。

电动汽车充电站的选址对于电动出行系统的有效性至关重要[11]。许多现有充电网络基于短期盈利的市场策略建设，通常优先考虑电动汽车拥有量较高的区域，而忽视采用率较低的地区 [12]。这种不均衡的分布使低收入人群所在的服务不足地区缺乏充足的充电站可达性，从而加剧社会经济不平等，并减缓向清洁交通的转型[12]。这些可达性差距凸显了开展战略性、数据驱动的基础设施规划的必要性。确保电动汽车基础设施具有社会公平性至关重要，因为服务不足的社区往往面临有限的可达性、更长的行驶距离以及更低的采用率。因此，将公平纳入基础设施设计对于实现公平且包容的清洁出行转型至关重要。此外，传统的选址分配方法通常将基础设施视为静态设施，未考虑整合移动充电技术的可能性，而此类技术能够应对短期波动

[13]。因此，尽管现有方法能够最大限度地提高高密度区域的利用率，但往往会使其他地区在可达性方面留下相当大的缺口。

为应对这些挑战，本研究提出了一种两阶段随机优化框架，用于在城市交通网络中协同部署固定充电站（FCS）和移动充电站（MCS）。该框架充分发挥固定基础设施与移动基础设施的互补作用。固定充电站建设成本高，且需要充足的电网容量，因此适合建在充电需求稳定且较高的地点。如果利用不足，可能造成经济损失。移动充电站则提供了一种灵活且成本较低的选择。它们可以弥补临时缺口、应对不确定的需求，并支持市场测试 [14]。此外，在永久性电网升级能够支持安装固定充电站之前，移动充电站还可作为过渡性解决方案。在此混合策略的基础上，该框架纳入社会经济因素，以确保人口和经济特征各异的社区都能公平地获得电动汽车充电基础设施。公平性通过区域特定权重因子衡量，这些因子基于四项关键社会经济因素：家庭收入中位数、人口密度、公共交通可达性和电动汽车拥有率。权重采用最佳-最差法（BWM）确定 [15], ，该方法通过系统整合专家判断来评估各因素的相对重要性。由此得到的公平性指数使我们能够为服务不足区域赋予更高权重，从而最大限度地缩小充电可及性的空间差异。

为改进固定充电站的候选选址，本文提出改进型ESS作为预处理步骤。改进型ESS基于Abbaas和Ventura提出的单一加油站边缘扫描算法（ESS）[16], ，通过将现有公共充电站纳入分析，拓展了连续选址方法。这有助于确定独特的候选点，以覆盖此前未覆盖的起讫点对，确保新选址与现有基础设施互为补充，而非重复建设。随后，这些经过优化的候选位置将用于第一阶段优化，以确定固定充电站的最优数量和选址。该阶段侧重于在遵守预算约束的前提下，最大限度地提升各区域的流量覆盖、公平性和可达性。第二阶段则在多个时段动态分配改进型ESS，以应对交通流和充电需求的变化。在需求情景确定后，将移动充电站重新部署至高需求区域，从而提升服务可用性、降低重新部署和运营成本，并确保长期公平覆盖。这一自适应阶段增强了网络的灵活性和韧性，确保在不确定且不断变化的条件下高效利用资源。

据作者所知，本文首次提出了一种综合性的两阶段随机优化框架，可同时应对流量不确定性、社会公平以及

固定式与移动式电动汽车充电站的联合部署。与传统的确定性模型或纯粹基于需求的模型不同，所提出的框架纳入了社会经济公平权重，以促进不同社区公平获取充电基础设施。本文还提出了改进的 ESS 方法，该方法结合现有充电设施，并在道路网络沿线确定潜在选址，从而减少站点配置中的冗余。通过整合这些要素，该框架为规划人员和政策制定者提供了一种可扩展、适应性强且注重公平的决策支持工具，助力其构建高效、 resilient 且具有社会包容性的电动汽车充电网络。

本文其余部分安排如下：第 2 节回顾相关文献。第 3 节阐述问题陈述。第 4 节介绍所提出的方法论。第 5 节讨论计算实验，涵盖数据生成、实验设置和结果分析。最后，第 6 节总结全文并展望未来研究方向。

2. 文献综述

电动汽车的快速普及增加了对可靠且便捷的充电基础设施的需求。这一需求受到成本、充电时间、站点位置和电网影响等因素的影响 [3, 17]。在这些因素中，充电基础设施的可用性和空间分布是影响电动汽车普及的关键因素。多项研究表明，与单纯的财政激励相比，基础设施位置是预测普及情况更有力的指标 [18, 19]。随着电动汽车普及程度不断提高，充电需求与交通模式和电力系统约束密切相关。因此，电动汽车基础设施规划着眼于优化充电桩选址、服务质量以及与可再生能源的协调，以确保电网稳定性和成本效益 [20-22]。了解用户为车辆充电的方式对于有效规划也至关重要。来自日本、英国和爱尔兰的实证研究揭示了充电习惯存在显著差异。私人用户通常依赖家庭充电或快速充电站，而商业用户则偏好工作场所充电或无需大幅变更路线的充电站 [23, 24]。此外，充电高峰时段凸显了优化路径规划、战略性站点选址、价格激励以及以社会福利为导向的规划的必要性，从而平衡电网需求并提升网络效率 [25-28]。

尽管已有这些见解，大多数现有规划模型仍是静态且确定性的。它们通常假设需求固定、交通状况一致。因此，以下小节将回顾电动汽车充电基础设施选址配置模型、影响充电可及性的人口统计和社会经济因素、移动充电站系统，以及用于处理交通网络中流量不确定性的随机优化方法。

2.1. 选址与分配问题

选址与分配建模在电动汽车充电网络设计中发挥着核心作用，它决定最优的充电站选址和容量，以平衡可达性、成本与电网稳定性 [3, 29-31]。近期研究将车辆路径规划、绕行减少以及与配电系统协调等概念纳入其中，以提高服务效率并确保电网可靠性 [32, 33]。为应对这些挑战，研究人员开发了流量型、节点型、路径型、行程型和网络均衡等不同建模范式，以刻画交通需求、充电可及性与能源供应之间的复杂相互作用 系统 [3]。

基于流的模型在识别主要出行路线上的高影响力位置方面尤其有效，因为它们捕捉的是车辆移动情况，而非静态需求。基于流的模型的早期代表性研究之一是Hodgson提出的流捕获选址模型（FCL）[34]。FCL模型及其扩展形式[35-38] 聚焦于高流量区域，通过纳入车辆续航里程限制、多站加油和时空需求变化等概念来提升覆盖率、减少绕行，从而提高站点选址和充电网络的有效性。在此基础上，美国、韩国、西班牙和中国等国家的众多研究采用基于流的框架来优化站点选址、降低运营成本并提升可达性[39-43]。然而，这些模型通常基于离散网络构建，候选站点仅限于现有节点。这种离散表示可能导致选址次优，因为它忽略了节点之间的潜在站点。为克服这一局限，研究人员引入了连续网络模型，将道路路段上的每个点都视为潜在站点位置 [44]。这些模型允许车辆绕行加油，从而扩大路线覆盖范围并确保全局最优性，这是离散方法无法保证的[45]。此外， Abbaas和Ventura [16] 开发了ESS，这是一种多项式时间精确方法，可系统地确定网络边上的全局最优加油位置。后续改进扩展了该框架，使其能够处理多个站点和字典序目标[46]。

基于节点的策略将充电站组织为相互连接的节点，从而高效分配并优化网络资源[3]。每个节点代表一个充电站或一组充电站，由中央统一管理，以监控电力流、调整定价，并根据实时需求分配电力[3]。许多研究采用基于节点的方法优化电动汽车充电站的位置，并考虑人口、需求和行驶时间等因素[47-49]。另有研究通过整合需求预测、交通流和多周期规划，进一步改进这些模型，以提升可扩展性和长期网络效率 [50-52]。相比之下，基于路径的方法沿车辆行驶路线布设充电站，以便及时提供服务、减少拥堵并缓解

里程焦虑。采用基于路径的模型的研究表明，在各种应用情景下，该方法能够改善交通流管理、降低系统成本并提升网络可达性[3, 53-55]。

基于行程的方法通过规划包含必要充电停靠点的路线来扩展这些模型，而不是将充电站视为彼此孤立的点[3]。这些模型在考虑电池电量、成本和充电站可用性的同时，通过减少停靠次数和缓解拥堵来提高效率与用户体验[3]。多项研究运用基于巡回的模型，通过减少绕行、降低安装成本和提升可达性，优化充电站的选址、规模和路径规划，从而确保充电网络高效、可靠地运行[56-58]。网络均衡框架通过平衡供需、降低成本并提升网络效率，优化电动汽车充电基础设施 [3]。这些模型综合考虑出行者行为、能源约束和流量相关因素，以缩短行程时间、缓解拥堵并提升社会福利[59-63]。其他研究则扩展了这一框架，以协调交通与电力系统，提升成本效益、服务质量和基础设施可达性[64-67]。虽然这些模型显著改善了电动汽车基础设施规划，但大多数模型忽略了现有充电网络的影响，也未能考虑交通流和需求的随机变化；当前论文旨在填补这些关键空白。

2.2. 人口与社会经济因素对电动汽车基础设施的影响

收入、种族、教育和住房等人口与社会经济因素，显著影响电动汽车充电基础设施的分布，往往导致不同社区之间无法平等获取充电服务[68-72]。研究表明，充电站集中分布在富裕的白人占多数的社区，而低收入、少数族裔和多单元住宅区的居民获取充电服务的机会有限，在纽约、芝加哥和加利福尼亚州各地的城市中尤为明显 [68-74]。经济活动、政治倾向以及与高速公路的距离也会影响充电桩选址，使选址偏向富裕的城市区域 [75]。此外，高昂的安装成本、电网限制以及有限的家庭充电选项加剧了这种差距，尤其是在农村和弱势地区 [76-78]。为缓解此类不平等，近期研究建议在充电站选址模型中纳入收入水平、人口密度或公共交通可达性等公平因素 [79, 80]。然而，目前大多数方法依赖事后公平性评估，或仅对公平问题进行定性处理，而未将其纳入优化模型。这表明，基础设施规划决策需要采用定量且以公平为中心的优化方法，明确纳入社会经济因素。

2.3. 移动充电站

应对电动汽车不断增长且难以预测的能源需求，是向电动交通系统转型过程中面临的一项重大挑战 [81]。充电需求会随局部拥堵、出行行为和季节性模式而波动 [82, 83], , 因此需要灵活且自适应的基础设施。这些复杂因素

要求提供灵活且能及时响应的充电解决方案。移动充电站已成为固定基础设施的一种经济高效的补充，尤其适用于服务不足或高需求区域 [84-88]。移动充电站的机动性使其能够快速部署、重新部署并接入电网，从而缓解固定充电站的拥堵、减轻里程焦虑并促进公平可及性 [89-93]。通过动态响应时空需求变化，移动充电站能够优化网络覆盖、缩短等待时间并提升用户满意度 [94-96]。此外，通过与太阳能和风能等可再生能源协调配合，移动充电站有助于提升电网稳定性和可持续性 [97, 98]。近期的进展，包括双层优化和基于李雅普诺夫的优化框架，可改进动态路径规划、调度和电池管理，从而在实时环境中提升运营效率、能源分配效率和盈利能力 [99-105]。尽管取得了这些进展，现有研究往往将移动充电站部署与固定基础设施分开考虑，并忽视随机流量变化。本研究针对这一不足，构建了一个一体化的两阶段随机框架，联合配置固定充电站和移动充电站，以提升灵活性、韧性和公平的网络覆盖。

2.4. 电动汽车基础设施的随机规划

不确定性会降低确定性模型在不可预测环境中的有效性，并增加其成本[105]。为了解决这一问题，随机规划利用概率分布刻画变异性，增强解决方案的稳健性[106]。稳健优化、概率优化、模糊优化和贝叶斯优化等多种方法已成功应用于物流、供应链、能源和生产计划等领域 [107-111]。在电动汽车领域，随机模型能够有效应对能源采购、动态定价和出行需求的波动，从而提高可靠性和决策效率[112, 113]。

两阶段随机规划通常通过根据实际结果将决策划分为第一阶段（不确定性出现前）行动和第二阶段（自适应）行动来处理不确定性 [114, 115]。这种基于情景的框架提高了灵活性，但在流量加油领域的应用仍然有限，而该领域的需求和供给条件存在不确定性 [116]。近期研究已将需求不确定性纳入电动汽车充电和换电站的流量拦截及动态服务模型 [117,118]，在需求不确定的情况下优化电力分配 [119]，并改进应对需求变异性的充电站选址 [120]。两阶段方法也已用于整合加油站的需求学习与动态部署 [121]，而其他研究则处理能源交易 [122]，续航里程 [123, 124]，电池状态、功耗 [125, 126]，以及随机出行行为方面的不确定性 [127-129]。总体而言，这些研究证实，随机优化，尤其是两阶段框架，能够提升不确定条件下电动汽车充电基础设施规划的适应性和稳健性。

2.5. 研究空白

经审阅的文献表明，充电基础设施规划已取得显著进展，但也揭示了重要局限。现有研究往往忽视现有充电基础设施的整合方式，将选址与分配决策分开处理，并依赖无法考虑流量不确定性和公平性问题的确定性假设。为弥补这些不足，本研究提出两项主要贡献。首先，我们通过将现有公共充电站纳入网络来改进 ESS，以避免重复建设并聚焦服务不足地区。这一调整通过针对影响力较大的候选站点，提高了站点布设效率、降低了安装成本，并提升了计算性能。该框架将多区域、多时段和公平导向规划纳入统一随机模型，从而拓展了连续偏差流加氢站选址（CDFRSL）[16] 问题。由此提出的方法为优化现实世界的电动汽车充电基础设施提供了可扩展、数据驱动且具有社会包容性的解决方案。其次，为管理不确定条件下的分配，我们构建了一个两阶段随机混合整数规划（MIP）模型，联合优化多个区域和时间段内固定充电站与移动充电站的部署。第一阶段根据平均流量和社会经济权重分配固定充电站，以确保公平可及性。相比之下，第二阶段则根据不同需求情景动态重新部署移动充电站，以降低重新部署成本并改善网络覆盖。

3. 问题陈述

本文提出一个优化框架，用于确定城市交通网络中固定充电站和移动充电站的最佳选址及配置策略。我们考虑一个连通无向交通网络，记为 $G(V, E)$，其中 V 表示顶点（互通立交）集合，E 表示边（道路路段）集合。连接顶点 v_a和$v_b \in V$ 的边记为（v_a, v_b）。该边是无向的，这意味着车辆可以从 v_a 驶向v_b ，反之亦然，且两个方向的距离相同。为避免重复，仅在 $a < b$时纳入边。

在该网络中，车辆从起点顶点 $v_i \in V$ 驶往目的地顶点 $v_j \in V$ ，沿途采用最短可加油路径，即至少包含一个位于车辆行驶范围内的可用充电站的路径。到达 v_j后，车辆沿同一路径反向返回 v_i ，完成一次往返行程。令 $q(v_i, v_j)$ 表示一对起讫点顶点，其中 v_i、$v_j \in V$ 和$i < j$。$q(v_i, v_j)$ 的平均交通流量记为 $f(v_i, v_j)$。该流量以单位时间往返次数计量，反映起讫点对之间两个方向的交通流量。$G(V, E)$ 是一个一般网络，因此网络中任意两点之间都可能存在多条路径。点 x_1和 x_2 之间的最短路径记为 $P(x_1, x_2)$，其长度记为 $d(x_1, x_2)$。两个

位于同一条边上的点 x_1 和 x_2之间的闭线段称为 $C(x_1, x_2)$，其内部点记为$int(C(x_1, x_2))$，该线段的长度为$l(x_1, x_2)$。

本文提出了一种混合优化框架，旨在多区域、多时段交通网络中公平且高效地进行固定充电站和移动充电站选址。该框架考虑空间和时间动态变化，以应对不同的电动汽车需求，同时平衡可达性、效率与公平。固定充电站为高需求区域提供稳定服务，而移动充电站则具备灵活性，能够满足短期需求激增。通过利用现有基础设施，并采用连续选址方法确定候选端点，该模型减少了冗余、提升了覆盖范围和计算效率，从而最大化全网络流量覆盖，并确保服务不足区域能够公平获得充电服务。

由于交通模式不断变化且用户行为难以预测，不同区域和时间段的充电需求各不相同。为解决这一问题，该模型采用基于情景的随机方法，明确考虑需求和资源可用性不确定性。该框架在各种可能条件下同时优化固定充电站选址和移动充电站部署，确保适应性、韧性和成本效益。通过将随机因素与财务和社会目标相结合，所提出的方法论支持稳健的基础设施规划，使其在现实世界的变化性环境中仍能保持有效。本问题的假设包括以下内容：

I. 充电站（固定充电站或移动充电站）没有容量限制，可为两个方向行驶的车辆提供服务。II. 所有车辆的行驶里程相同，称为 R。III. 车辆在起讫点对之间往返行驶。一次完整的往返行程包括从起点顶点到目的地顶点的去程，以及沿同一路径反向从目的地顶点返回起点顶点的返程。IV. 去程和返程开始时的电量都足以至少行驶 αR，其中 $0 \leq \alpha \leq 1$。此外，车辆在每个方向上最多允许进行一次加油操作。V. 任意两点之间的距离 x_1、x_2 均具有对称性；因此，$d(x_1、\ x_2) = d(x_2、\ x_1)$。VI. 驾驶员可以偏离最短路径 $P(v_i、\ v_j)$，前往充电站，但不得超出车辆的行驶里程。

该第一项假设确保每个充电站（固定充电站或移动充电站）都能为双向行驶的所有车辆提供服务。该第二项假设指出，所有电动汽车的行驶里程均相同 R，因此充电需求与行驶距离成正比。该第三项假设将起讫点流定义为完整的往返行程，这反映了许多交通场景中的典型出行行为，例如

从家到工作地点通勤并返回。该第四项假设要求每辆电动汽车出发时具备足够的能量，至少可行驶αR，从而维持能够确保双向行程可靠运行的最小荷电状态。该假设意味着，任意一条边的长度$(v_i, v_j) \in E$必须小于或等于$2\alpha R$，以确保车辆能够从其任一顶点出发行驶，并在不超出续航里程的情况下到达充电站。此外，对于大多数城内应用，在合理的满电续航里程条件下，车辆在单次单向行程中需要多次再充电的可能性很低。该第五项假设指出，网络中任意两点之间的距离均具有对称性。该第六项假设反映了现实中的驾驶员行为，允许电动汽车偏离最短路径$P(v_i, v_j)$绕行至附近的充电站，同时不超出其续航里程。

4. 方法论

本节介绍所提出的方法论。第 4.1 小节阐述所提出的改进型ESS算法，该算法考虑现有充电站，并确定充电站的候选位置。第 4.2 小节采用最佳-最差法确定各区域的社会经济权重，以体现模型中的公平性考量。第 4.3 小节介绍两阶段随机数学模型，该模型旨在优化各区域及时间段内固定充电站和移动充电站的位置与配置。

4.1. 单加油站的改进边缘扫描算法

Abbaas和Ventura [16] 提出了 ESS 算法，用于求解一般网络上的 CDFRSL 问题。该算法系统地扫描网络中的每条边，并针对每个起讫点对确定加油区段；加油区段是指边上连续的一段，在给定车辆续航里程和偏离限制的情况下，加油站可在该路段上为该起讫点对之间的流量提供服务。ESS 算法无需评估边上的所有点，而是证明这些加油区段的端点构成的整体集合始终包含一个使流量覆盖最大化的最优解。因此，ESS 算法在保持全局最优性的同时，将连续问题转化为有限的候选集合。起讫点对集合（记为 Q^o）定义如下：

$$Q^o = \{q(v_i, v_j) | d(v_i, v_j) \leq 2\alpha R, f(v_i, v_j) > 0, i < j, v_i, v_j \in V\}. \quad (1)$$

如果位于点 x 的充电站与 v_i 和 v_j 的距离均在 αR 范围内，则起讫点对 $q(v_i, v_j)$ 被视为已覆盖。位于点 x 的充电站所覆盖的起讫点对集合记为 $S^o(x)$，定义如下：

$$S^o(x) = \{q(v_i, v_j) | d(v_i, x) \leq \alpha R, d(x, v_j) \leq \alpha R, i < j, q(v_i, v_j) \in Q^o\}. \quad (2)$$

充电站在 x 覆盖的总交通流量记为 $F^o(x)$：

$$F^o(x) = \sum_{q(v_i, v_j) \in S^o(x)} f(v_i, v_j). \quad (3)$$

本研究对 ESS 算法进行了扩展，以提高计算效率并减少重复覆盖。改进型ESS 将现有充电基础设施纳入优化过程，识别已覆盖的区域，并将新的站点选址集中在服务不足区域。以下步骤概述了如何确定网络中的最终候选位置集合。

步骤 1. 确定现有站点的覆盖域：令 U 表示网络中现有充电站的集合。每个站点 $u \in U$ 位于网络中的点 x_u 所覆盖的起讫点对集合为 $S(x_u)$。现有站点的总体覆盖范围，即合并后的覆盖域 $Dom(U)$，定义如下：

$$Dom(U) = \bigcup_{u \in U} S^o(x_u). \tag{4}$$

这包括至少一个现有站点能够服务的所有起讫点对。

步骤2. 排除已覆盖的起讫点对：确定 $Dom(U)$后，将已得到服务的起讫点对排除在后续分析之外，以便集中计算资源处理剩余的未覆盖需求。未覆盖起讫点对集合 Q定义如下：

$$Q = Q^o \backslash Dom(U). \tag{5}$$

步骤 3. 对未覆盖的起讫点对应用 ESS 算法：现在，我们将 [16] 中介绍的 ESS 算法应用于未覆盖的起讫点对集合。为完整起见，下面简要介绍 ESS 算法。

ESS 算法根据车辆经过包含充电站的边的方式，将前往充电站的车辆行程分为两类。对于类型 1 行程，车辆通过完整经过边 $(v_a, v_b) \in E$ 到达充电站。在此类行程中，车辆可以通过 v_a 进入该边，并通过 v_b 驶出（图 2）；也可以通过 v_b 进入，并通过 v_a 驶出（图 3）。加油前沿边 $(v_a, v_b) \in E$ 行驶的最大距离取决于车辆进入该边时剩余的续航里程以及边长。该距离记为 $\gamma(v_k;\ v_r, v_c)$，其中 v_k 是原始行程中的起点顶点，或返程中的目的地顶点；v_r 是包含加油站的边的入口顶点；v_c 是同一条边上的另一个顶点。$\gamma(v_k;\ v_r, v_c)$定义如下：

$$\gamma(v_k; v_r, v_c) = \min\{\alpha R - d(v_k, v_r), l(v_a, v_b)\},\ k = i, j; r = a, b; c \neq r. \tag{6}$$

执行类型 1 行程的车辆的可行加油集合可表示为 ：

$$RS_1^{(r)}(v_i, v_j; v_a, v_b) = \{x \in (v_a, v_b) \,|\, l(v_r, x) \leq \gamma(v_i; v_r, v_c) \text{ and } l(v_c, x) \leq \gamma(v_j; v_c, v_r)\}, \quad r = a, b; c = a, b; c \neq r. \tag{7}$$

结合方向情景 (a) 和 (b)，即可得到完整的类型1加油区段：

$$RS_1(v_i, v_j;\ v_a, v_b) = RS_1^{(a)}(v_i, v_j; v_a, v_b) \cup RS_1^{(b)}(v_i, v_j; v_a, v_b). \quad (8)$$

As 如图4 和 图5所示，类型1加油集合最多可包含四个端点 s.

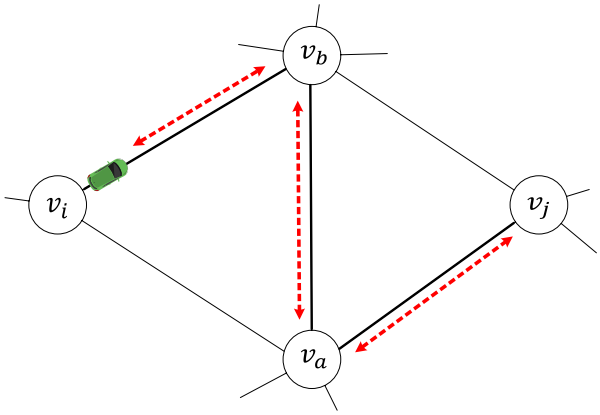

图 2：类型1场景（a）：从 v_i 到 v_j 经由 v_a 和 v_b

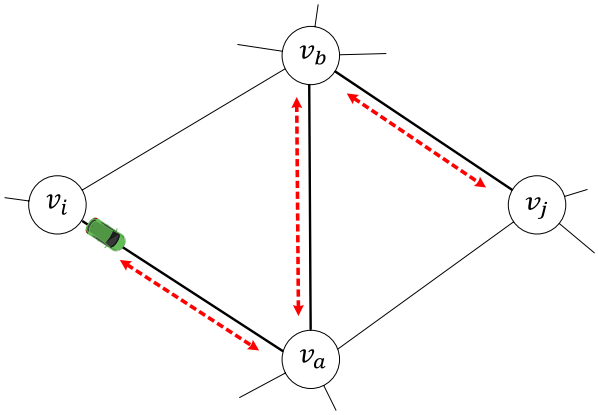

图 3：类型1场景（b）：从 v_i 到 v_j 经由 v_b 和 v_a

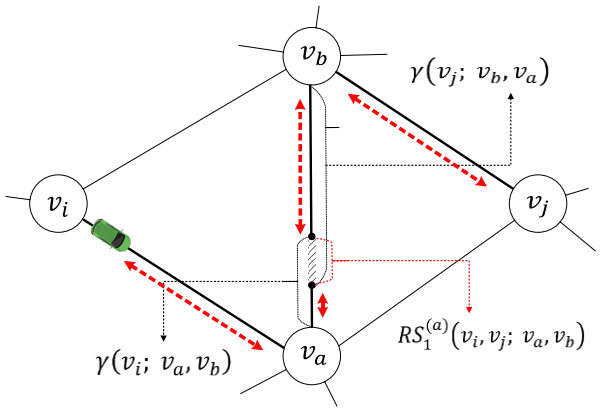

图4：类型1场景（a）的加油区段

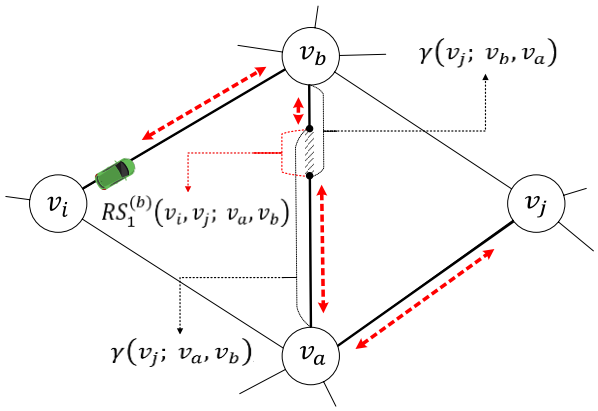

图5：类型1场景（b）的加油区段

在类型2行程中，车辆沿边 $(v_a, v_b) \in E$加油。然而，在这种情况下，车辆进入该边，驶向充电站，掉头后从同一入口顶点驶离该边。车辆可以从v_a （图 6）或v_b （图 7）进入该边。沿边 $(v_a, v_b) \in E$ 加油前可能行驶的最大距离，取决于车辆进入该边时剩余的续航里程以及边长。该距离记为$\delta^{(r)}(v_i, v_j;\ v_a, v_b)$，其中$q(v_i, v_j) \in Q$，$(v_a, v_b) \in E$ 且$v_r \in \{v_a, v_b\}$是包含加油站的边的入口顶点。$\delta^{(r)}(v_i, v_j;\ v_a, v_b)$ 定义如下：

$$\delta^{(r)}(v_i, v_j; v_a, v_b) = \min\{\alpha R - \max\{d(v_i, v_r), d(v_j, v_r)\}, l(v_a, v_b)\}, \quad r = a, b, \quad (9)$$

相应的加油区段定义见方程（(10)）：

$$RS_2^{(r)}(v_i, v_j; v_a, v_b) = \{x \in (v_a, v_b) | l(v_r, x) \le \delta^{(r)}(v_i, v_j; v_a, v_b)\}, \quad r = a, b. \tag{10}$$

两种情景的整体加油集合由方程（(11）给出。

$$RS_2(v_i, v_j; v_a, v_b) = RS_2^{(a)}(v_i, v_j; v_a, v_b) \cup RS_2^{(b)}(v_i, v_j; v_a, v_b). \tag{11}$$

图8和图9展示了两种情景下的类型2加油路段，说明车辆如何在完成行程时偏离同一顶点并返回该顶点。

在确定两种行程类型的加氢集合之后，未覆盖起讫点对$q(v_i, v_j) \in Q$ 在边$(v_a, v_b) \in E$ 上的总体加油集合为：

$$RS(v_i, v_j; v_a, v_b) = RS_1(v_i, v_j; v_a, v_b) \cup RS_2(v_i, v_j; v_a, v_b). \tag{12}$$

每个组合集合最多可包含八个端点，类型 1 行程和类型2行程各提供四个，表示为 $w_{v_i,}{}^{k}{}_{v_j\ v_a\, v_b}$；，对于 $k = 1$，……，8，如方程 ((13) 所示。

$$EP(v_i, v_j;\ v_a, v_b) = \left\{ w^k_{v_i, v_j;\, v_a, v_b} \middle| k = 1,2 \ldots, 8 \right\}. \tag{13}$$

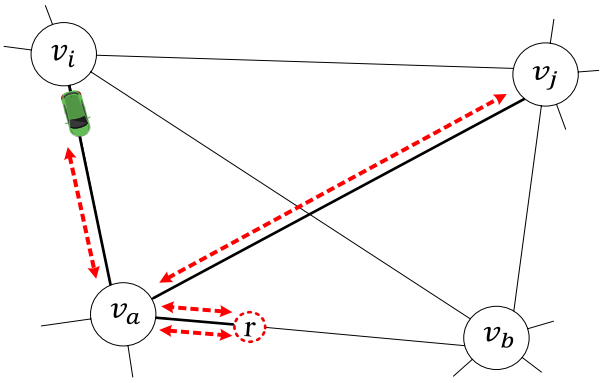

图6：类型2情景（a）；原始行程从 v_i 至v_j：偏离并返回v_a

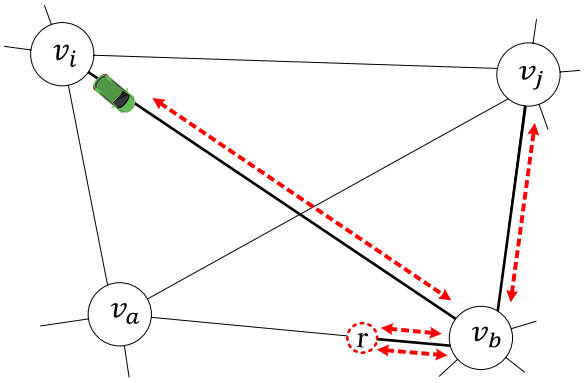

图7：类型2情景（b）；原始行程从 v_i 至v_j：偏离并返回v_b

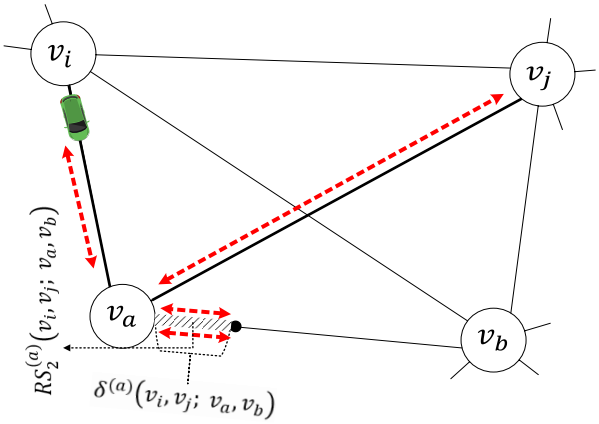

图8：类型2情景（a）的加油区段

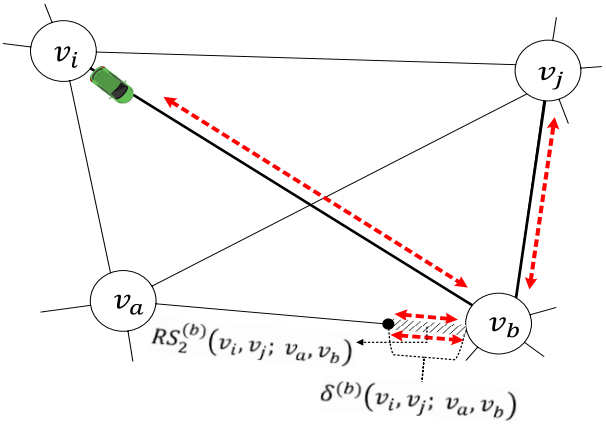

图9：类型2情景（b）的加油区段

考虑边 $(v_a, v_b) \in E$ 上所有可能的加油集合所对应的起讫点对后，将该边上的端点集合 $EP(v_a, v_b)$ 定义如下：

$$EP(v_a, v_b) = \bigcup_{q(v_i,v_j)\in Q} EP(v_i, v_j;\ v_a, v_b). \tag{14}$$

这些未覆盖起讫点对的端点全集定义如下：

$$EP = \bigcup_{(v_a,v_b)\in E} EP(v_a, v_b). \tag{15}$$

多个起讫点对的加氢路段可能重叠，因此某些端点可以覆盖多个起讫点对之间的流量。位于端点 $w \in EP$ 的充电站可以覆盖一组起讫点对 $S(w)$，以及总流量 $F(w)$，定义如下：

$$S(w) = \{q(v_i, v_j) | d(v_i, w) \le \alpha R, d(w, v_j) \le \alpha R, i < j, q(v_i, v_j) \in Q\}, \tag{16}$$

$$F(w) = \sum_{q(v_i,v_j)\in S(w)} f(v_i, v_j). \tag{17}$$

4.2. 使用最佳-最差法推导社会经济权重

为将社会公平纳入优化框架，我们根据社会经济因素将网络划分为若干区域，记为 Z。随后应用最佳-最差法 [15] 推导区域特定权重，并将其纳入下一小节所述的数学建模中。权重计算过程考虑四个关键因素：家庭收入中位数、人口密度、公共交通可达性和电动汽车拥有率。这样可确保充电基础设施部署既反映各区域的社区需求，也体现其采用潜力。低收入且公共交通可达性有限的地区，最能受益于电动汽车较低的运营成本以及可用的政府激励措施。此外，人口密度高且已有一定电动汽车拥有量，表明城市需求旺盛、未来增长潜力较大，同时家庭充电的可能性较低。为实现公平且基于数据的规划，我们根据各区域的社会经济特征为其分配权重因子。最佳-最差法通过比较最重要和最不重要的准则来评估各因素的重要性，从而减少偏差并确保一致性。该方法结合专家判断与定量数据，以支持在各区域间公平配置电动汽车基础设施。以下概述了在此情境下应用最佳-最差法的步骤。

步骤 1. 确定最佳和最差标准：决策者确定最重要和最不重要的社会经济因素（例如，收入中位数最重要，电动汽车拥有量最不重要）。

步骤2. 最佳标准与其他标准比较：对最重要（最佳）因素进行1至9级评分，其中1表示同等重要，9表示极端重要。由此得到最佳-其他向量：

$$O_b = [o_{b1}, o_{b2}, o_{b3}, \dots, o_{bI}], \tag{18}$$

其中，I 表示因素的数量，而o_{bi} 表示最佳因素相对于i^{th} 因素的重要性。

步骤 3. 与最差因素进行比较：随后，使用相同的量表将所有因素与重要性最低（最差）的因素进行比较，从而得出其他因素至最差因素向量：

$$O_w = [o_{1w}, o_{2w}, o_{3w}, \dots, o_{Iw}], \tag{19}$$

其中，o_{iw} 表示i^{th} 因素相对于最差因素的重要性。

步骤 4. 优化模型：通过求解优化模型，确定系数 θ_i ，这些系数表示因素 $i \in \{1, \dots, I\}$ 的相对重要性。该模型通过以下方式最小化专家判断与推导出的权重比之间的最大偏差：

$$\text{Min } \varepsilon \tag{20}$$

约束条件：

$$\left|\frac{\theta_b}{\theta_i} - o_{bi}\right| \le \varepsilon, \forall i \in \{1, \dots, I\}, \tag{21}$$

$$\left|\frac{\theta_i}{\theta_w} - o_{iw}\right| \le \varepsilon, \forall i \in \{1, \dots, I\}, \tag{22}$$

$$\sum_{i=1}^{I} \theta_i = 1, \theta_i \ge 0, \forall i \in \{1, \dots, I\}, \tag{23}$$

$$\varepsilon \ge 0. \tag{24}$$

目标函数 ((20) 最小化 ε，它表示计算得出的权重比与专家提供的比较结果之间的最大偏差。约束集 ((21-(22) 分别确保与最佳因素至其他因素判断和其他因素至最差因素判断保持一致。约束集 ((23) 对权重进行归一化，使其总和为 1 且非负，从而确保重要性比例有效。约束 ((24) 确保偏差变量 ε 非负。

步骤 5. 计算区域特定权重：令 δ_i^z 为社会经济因素 i 在区域z中的观测值，并令 δ_i^{min} 和 δ_i^{max} 分别表示所有区域中因素 i 的观测最小值和最大值。由于所考虑的因素采用不同的量表进行测量，因此按如下方式对其进行归一化：

$$G_i^z = \frac{\delta_i^z - \delta_i^{min}}{\delta_i^{max} - \delta_i^{min}}, \tag{25}$$

其中，G_i^z 是区域 z 中i^{th} 社会经济因素的归一化值。此归一化将所有值映射到区间 [0,1], ，确保不同因素之间具有可比性。为保持解释的一致性，所有因素均按较高值表示更高需求或优先级的方式进行缩放。对于收入和公共交通可达性等较高值意味着脆弱性较低的因素，则使用 $1 - G_i^z$ 对量表进行反向处理。这一转换确保所有因素都能对公平性加权过程作出有意义且一致的贡献，使数据与规划目标相契合。

接下来，使用归一化因子值 G_i^z 及其对应的重要性系数 θ_i ，计算每个区域 $z \in Z$ 的综合社会经济权重，记为 μ_z，如下所示：

$$\mu_z = \sum_{i=1}^{I} \theta_i G_i^z, \forall z \in Z, \tag{26}$$

该过程确保社会经济劣势更大的区域获得更高的综合权重（μ_z），从而在后续优化过程中优先考虑这些区域。由于我们的目标函数定义在起讫点对之间的流量上，因此还需要为每个起讫点对 $q(v_i, v_j)$ 定义一个社会经济权重，记为 $\mu_{q(v_i,v_j)}$。然而，起点和终点顶点可能位于两个不同的区域。此外，起讫点对之间的路径可能经过多个区域。将区域权重映射为起讫点权重有多种方式。例如，$\mu_{q(v_i,v_j)}$ 可以计算为沿起讫点路径各区域权重的距离加权平均值，也可以计算为起点区域和终点区域权重的平均值。在本研究中，我们采用保守优先规则，将 $\mu_{q(v_i,v_j)}$ 设为起点和终点区域权重的最大值，从而使至少涉及一个高度劣势区域的起讫点对在覆盖目标中获得更高优先级。令 V_z 为区域 $z \in Z$ 中的顶点集，则 $\mu_{q(v_i,v_j)}$ 可定义如下：

$$\mu_{q(v_i,v_j)} = \max\{\mu_z, \mu_{z'}\}, v_i \in V_z, v_j \in V_{z'}, q(v_i, v_j) \in Q. \tag{27}$$

该方法可防止公平效应在混合区域中被稀释，确保对弱势社区作出响应，并体现以公平为导向的规划。它还提供透明度，因为政策制定者可以将每个充电站的选址追溯到其所发球的最高优先级区域。

4.3. 数学建模

所提出的模型采用两阶段随机规划框架，以在不确定性下优化固定充电站和移动充电站的选址。通过明确纳入空间、时间和社会经济因素，该模型促进财政资源的高效利用以及对电动汽车充电基础设施的公平可及性。下文给出该问题第一阶段所使用的符号和数学建模。

Sets

Q：未被现有固定充电站覆盖的起讫点对集合EP:
端点集合

参数
A: $(|EP| \times |Q|)$ 二元矩阵，其中元素 $a_{w\,q(v_i,\ v_j)}$ 的值为 1 表示起讫点对$q(v_i, v_j) \in Q$ 可由位于端点 $w \in EP$ 的充电站覆盖，否则为 0

c^f:　　购买和安装单个固定充电站的成本B^f：用于购买和安装固定充电站的预算$f(v_i, v_j)$：起讫点对之间的平均交通流量 $q(v_i, v_j)$ 以单位时间往返次数计
$\mu_{q(v_i,v_j)}$：起讫点对 $q(v_i, v_j)$ 的综合权重 $\in Q$

第一阶段决策变量

x_w: 二元变量：若在端点 $w \in EP$ 设置固定充电站，则取值为 1；否则取值为 0$y_{q(v_i,v_j)}$: 二元变量：若起讫点对 $q(v_i, v_j) \in Q$ 至少被一个固定充电站覆盖，则取值为 1；否则取值为 0

固定与移动充电设施选址-分配问题可建模为一个两阶段模型。第一阶段侧重于固定充电站的选址，以最大化混合目标函数；该函数在考虑网络中社会经济权重的同时，最大化覆盖范围。第一阶段数学模型如下：

$$\text{Max: } F_1 = \sum_{q(v_i,v_j)\in Q} \left(1 + \mu_{q(v_i,v_j)}\right) f(v_i, v_j)\, y_{q(v_i,v_j)}, \tag{28}$$

约束条件：

$$\sum_{w\in EP} a_{wq(v_i,v_j)} x_w \geq y_{q(v_i,v_j)}, \forall q(v_i, v_j) \in Q, \tag{29}$$

$$\sum_{w\in EP} c^f x_w \leq B^f, \tag{30}$$

$$y_{q(v_i,v_j)}, x_w \in \{0, 1\}, \forall q(v_i, v_j) \in Q, w \in EP. \tag{31}$$

方程（(28）定义了第一阶段目标函数，该函数旨在最大化固定充电站所覆盖的加权交通流总量。每个起讫点对 $q(v_i, v_j) \in Q$ 均根据其平均交通流量 $f(v_i, v_j)$和综合社会经济因子 $\mu_{q(v_i,v_j)}$赋予权重。约束集（(29）确保只有在选定至少一个能够服务该起讫点对的端点 $w \in EP$ 并安装固定充电站后，该起讫点对$q(v_i, v_j) \in Q$ 之间的交通流才会被视为已覆盖。约束（(30）对固定充电站部署施加预算上限，将总安装成本限制在可用预算 B^f以内。约束（(31）定义了决策变量的取值范围。二元变量 x_w, $w \in EP$ 表示第一阶段的决策。具体而言，如果 $x_w = 1$ ，则建议在点 $w \in EP$安装新的固定充电站。此外，对于每个起讫点对 $q(v_i, v_j) \in Q$ ，若满足$y_{q(v_i,v_j)} = 1$ ，则其交通流由至少一个固定充电站覆盖。这些第一阶段决策确定了固定基础设施及其覆盖范围，并将在第二阶段作为已知参数使用。

在第二阶段，我们考虑一组情景（记为 S），以表示一组时间段（记为 T）内交通流的不确定性。令 N 为端点与现有充电站位置的并集，定义如下：

$$N = U \cup E. \tag{32}$$

此外，令 N^f 为设有固定充电站（现有和新增）的地点集合，N^m 为未被选定用于安装新增固定充电站的其余端点集合。这两个集合可定义如下：

$$N^f = U \cup \{w \in EP | x_w = 1, w \in EP\}, \tag{33}$$

$$N^m = N \backslash N^f. \tag{34}$$

此外，令集合 中未被任何固定充电站覆盖的起讫点对记为 Q^m。该集合可定义为 ：

$$Q^m = Q \backslash \left\{ q(v_i, v_j) | y_{q(v_i,v_j)} = 1, q(v_i, v_j) \in Q \right\}. \tag{35}$$

第二阶段模型将移动充电站分配至 N^m 中的点，以覆盖固定充电站未覆盖的额外流量。对于第二阶段，我们考虑以下假设：

I. 移动充电站在网络中任意两点之间移动时，均需承担每英里的重新部署成本。II. 在服务 N^m 中的某个地点后，每个移动充电站都必须前往一座固定充电站，并在那里至少停留一个时段进行再充电，然后才能被派往另一个服务地点。

第一个假设将重新部署成本纳入考量，包括燃料消耗和行驶时间，并抑制移动充电站在网络中进行不必要的移动。第二个假设要求移动充电站在不同服务地点之间不能直接行驶，而必须先进行再充电，从而确保运营可行性，并反映现实中的部署实践。

第二阶段目标函数同时纳入流量覆盖和重新部署成本。由于这两项的计量单位不同，因此不能直接汇总。为此，我们引入参数 ε，表示每单位服务流量 [130]所产生的综合经济和社会效益。通过这一转换，可将流量覆盖转化为货币当量，使两个组成部分的计量单位保持一致，从而能够最大化系统净效益。下面给出第二阶段的补充符号表，随后介绍数学模型。

Sets

Q^m： 未被现有固定充电站覆盖的起讫点对集合T： 离散时间段集合S： 交通流情景集合M： 移动充电站集合N： 端点与现有充电站位置的组合集合

N^f：FCS位置集合，包括现有位置和新选定的位置N^m：可用于部署移动充电站的端点集合

参数

ε：每单位服务流量带来的经济和社会效益。λ：MCS迁移的每英里成本P_s：情景 $s \in S$ 的概率 $f_{ts}(v_i, v_j)$：情景 $s \in Sd(x_1, x_2)$ 下时段 $t \in T$ 起讫点对 $q(v_i, v_j) \in Q$ 之间的预期交通流量： 网络中点 x_1 和点 x_2 之间的距离c^m：购买和安装单个移动充电站的成本 B^m：用于购买移动充电站的预算

第二阶段决策变量

φ_m：二元变量；若移动充电站 m 在规划期内至少部署一次，则取值为 1，否则为 0。k_{tmw}：二元变量；若移动充电站 $m \in M$ 在时段 $t \in T$分配至端点 $w \in N$，则取值为 1，否则为 0$y_{tq(v_i,v_j)}$：二元变量；若起讫点对 $q(v_i, v_j) \in Q$ 在时段 $t \in T$由至少一个移动充电站覆盖，则取值为 1，否则为 0$r_{tmww'}$：二元变量；若移动充电站 m 在时段 t从端点 w 迁移至时段 $t+1$的端点 w'，其中 $w \in N$，则取值为 1，否则为 0

第二阶段数学模型如下：

$$\text{Max: } F_2 = \sum_{s\in S}\sum_{t\in T} P_s \left(\sum_{q(v_i,v_j)\in Q^m} \varepsilon(1+\mu_{q(v_i,v_j)}) f_{ts}(v_i,v_j) y_{tq(v_i,v_j)} - \sum_{m\in M}\sum_{w,w'\in N} \lambda r_{tmww'} d(w,w')\right), \tag{36}$$

满足以下条件：

$$\sum_{m\in M}\sum_{w\in N^m} a_{wq(v_i,v_j)} k_{tmw} \geq y_{tq(v_i,v_j)}, \forall q(v_i,v_j) \in Q^m, t \in T, \tag{37}$$

$$\sum_{w\in N} k_{tmw} \leq 1, \forall m \in M, \forall t \in T, \tag{38}$$

$$r_{tmww'} \geq k_{tmw} + k_{(t+1)mw'} - 1, \forall t \in \{1,2,\dots,|T|-1\}, m \in M, w, w' \in N, \tag{39}$$

$$\sum_{w'\in N^f} k_{(t+1)mw'} \geq \sum_{w\in N^m} k_{tmw}, \forall t \in \{1,2,\dots,|T|-1\}, m \in M, \tag{40}$$

$$\varphi_m \geq k_{tmw}, \forall m \in M, t \in T, w \in N^m, \tag{41}$$

$$\sum_{m\in M} c^m \varphi_m \leq B^m, \tag{42}$$

$$k_{tmw} \in \{0,1\}, \forall t \in T, m \in M, \forall w \in N^m, \tag{43}$$

$$y_{tq(v_i,v_j)}, r_{tmww'}, \varphi_m \in \{0,1\}, \forall t \in T, q(v_i,v_j) \in Q^m, m \in M, w, w' \in N. \tag{44}$$

方程 ((36) 定义了第二阶段目标函数，其目标是最大化所有情景和时段中，通过将覆盖范围扩展到固定充电站未覆盖的流量而获得的期望收益。第一项体现了使用移动充电站为来自 Q^m 的未覆盖起讫点对提供服务所产生的社会经济价值。每条流量均根据其期望需求 $f_{ts}(v_i, v_j)$、公平因子 $(1+\mu_{q(v_i,v_j)})$ 以及效益参数ε 加权；该参数将流量覆盖转换为货币当量。第二项扣除移动充电站搬迁成本。约束集 ((37) 确保只有当至少一辆移动充电站停驻在能够为该起讫点对提供服务的端点 $w \in N^m$ 时，才将时段 t 内起讫点对 $q(v_i,v_j) \in Q$ 之间的流量视为已覆盖。约束 ((38) 限制每辆移动充电站在每个时段最多只能分配到一个位置。约束集 ((39) 建立移动充电站位置决策与搬迁事件之间的逻辑关系。当一辆移动充电站在时段 $t \in$ 从端点 $w \in N$ 移至时段 $t+1$ 的端点 $w' \in N$ 时，该约束会激活搬迁变量，其中 $t \in \in \{1,2,\dots,|T|-1\}$。约束集 ((40) 强制执行强制充电行为。它要求，如果一辆移动充电站在时段 t 于服务节点 $w \in N^m$ 提供服务，则必须在时段 $t+1$ 移至固定式充电站$w' \in N^f$ 进行充电。约束集 ((41) 定义激活变量 φ_m；如果移动充电站 m 在规划期内至少部署一次，该变量即取值为 1。约束 ((42) 对移动充电站部署施加预算上限。最后，约束集 ((43) 和 ((44) 定义了决策变量的取值域。

5. 计算实验

本节展示并评估所提出的两阶段随机优化模型在联合部署固定式和移动式电动汽车充电站方面的性能。我们考察了多个加权情景，这些情景分别优先考虑不同的社会经济因素，以评估其对基础设施选址和服务覆盖的影响。我们将所提出的框架应用于得克萨斯州贝克萨尔县的真实交通网络。如图10所示，现有的大功率公共电动汽车充电站集中在该县的中部和北部地区，而南部及外围地区的服务仍然不足。这种空间失衡凸显了战略性基础设施规划的必要性，以改善网络可达性、提升空间公平并提高整体充电系统效率。本节其余部分安排如下。第 5.1 小节介绍数据生成过程，包括构建真实的基于区域的交通网络、识别现有充电基础设施，以及纳入社会经济指标。第 5.2 小节介绍实验设置，包括求解器配置和模型参数。第 5.3 小节报告并分析

结果，重点关注分阶段决策、政策敏感性以及移动充电灵活性的运营价值。

5.1. 数据生成

计算实验在基于得克萨斯州贝克萨尔县的网络上开展。核心输入包括地理布局、分区边界、区域间距离和社会经济指标，均来自真实世界数据源，而交通流量则通过合成生成，以代表广泛的运行条件。区域结构遵循学区边界，如图10所示，并利用来自贝克萨尔县 GIS Hub和东北独立学区（NEISD）数据集的家庭收入中位数和教育水平数据构建 [131, 132]。现有公共直流快速充电站通过PlugShare平台识别。仅纳入普遍可及的公共站点[133], , 构成用于评估所提出部署策略的基准基础设施。所得交通网络由50个顶点和70条边组成。车辆的续航里程为$R = 10$英里。起点和终点顶点处车辆油箱中的燃油比例为$\alpha = 0.5$。交通流量$f(v_i, v_j)$以每日往返行程计，针对每个起讫点对 $q(v_i, v_j), i < j$，在整个网络中随机生成。所有现有及潜在充电站位置之间的距离来自 Google 地图数据，以英里计量，以反映Bexar县网络中的真实出行条件。

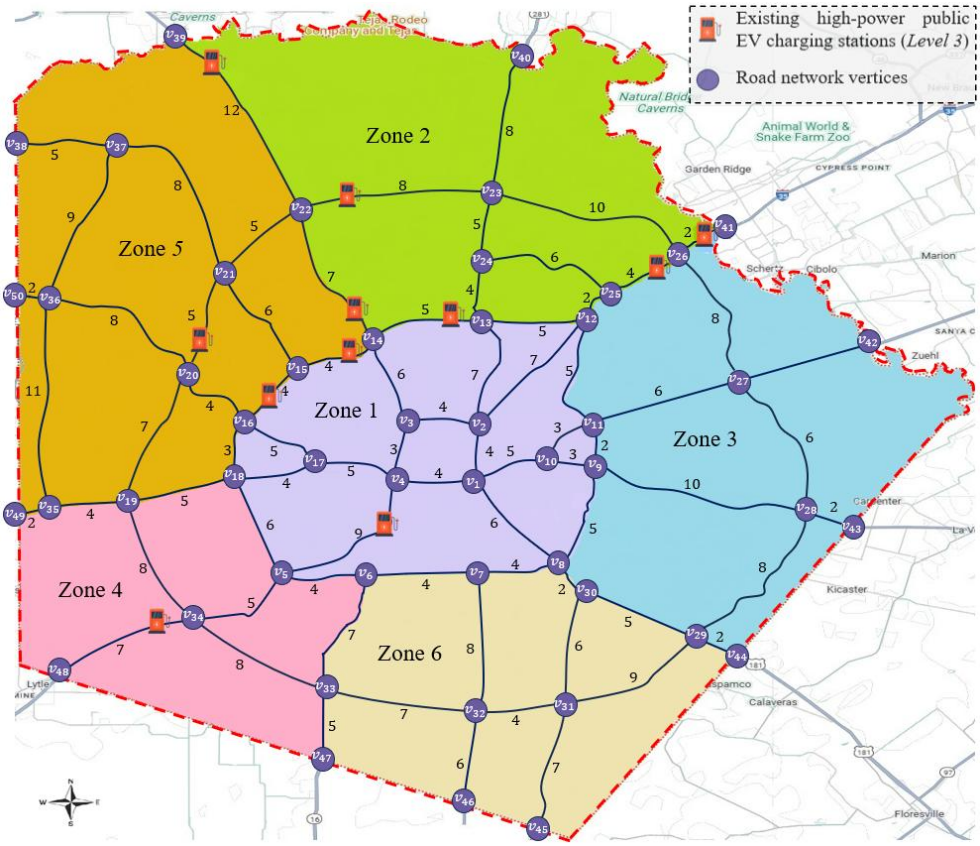

图10：贝克萨尔县社会经济分区中大功率公共电动汽车充电站的分布

如前几节所述，我们考虑四个关键社会经济因素来说明所提出的方法论，这些因素为：家庭收入中位数、人口密度、公共交通可达性和电动汽车拥有率。这些因素同时刻画了可达性与采用潜力，并广泛应用于城市规划、公共投资优先排序和出行公平框架[134]。

家庭收入中位数和人口密度数据来源于美国人口普查局的美国社区调查（ACS）以及圣安东尼奥市开放数据门户 [135-137]。公共交通可达性根据与VIA Metropolitan Transit运营的主要线路的邻近程度进行定性评估 [138]。靠近高频率且覆盖范围广泛的公交走廊的区域被归类为“高”可达性，而服务部分覆盖或有限的区域则归类为“中等”或“低”可达性。电动汽车拥有量估计数据来源于得克萨斯州机动车辆管理局提供的车辆登记记录，以及Atlas EV Hub发布的汇总趋势数据 [139]。这些数据与美国人口普查局的家庭统计数据相结合，用于计算电动汽车拥有率，即拥有至少一辆电动汽车的家庭所占的百分比

每个区域内拥有至少一辆电动汽车的家庭。表1总结了贝克萨尔县六个预定义区域中四项社会经济因素的数值。

表1：贝克萨尔县各指定区域的社会经济因素

Zone	收入中位数 ($)	人口密度 （每平方英里）	公共交通可达性	电动汽车拥有量 (%)
z	δ_1^z	δ_2^z	δ_3^z	δ_4^z
1	42,000	5,200	High	4.5
2	60,000	3,800	中等	5.1
3	37,000	6,000	Low	2.9
4	54,000	4,600	中等	3.5
5	33,000	3,000	Low	2.2
6	48,000	5,800	High	3.8

5.2. 5.2 实验设置

为评估所提出优化模型的性能，我们使用 Python 3.11.10 实现该模型，并通过 Gurobi 优化器 12.0.3 求解。所有计算实验均在一台 Windows 工作站上进行，该工作站配备英特尔酷睿 i9 处理器（3.00 GHz）和 16 GB 内存。

为考察政策制定者和专家在实践中常用的不同基础设施规划策略，我们使用最佳-最差法构建了四种情形。在每种情形中，专家首先根据政策目标和运营优先事项，确定最重要（最佳）和最不重要（最差）的社会经济因素。随后，采用标准的 1-9 评价尺度征询专家判断，以构建最佳因素至其他因素和其他项与最差项比较向量 O_b 和 O_w，如方程 ((18, (19) 中所定义。随后，使用最佳-最差法优化模型将这些评估结果转换为定量因素权重，并设置约束 ((20-(24)，以确保一致性、透明度和优先级归一化。

在案例 A（公平导向规划）中，政策制定者通过采用$O_b = [1,3,6,9]$ 和 $O_w = [9,5,2,1]$，将家庭收入中位数选为最重要因素，将电动汽车拥有量选为最不重要因素，以此强调经济脆弱性。这种配置体现了一种规划视角，即将公共投资导向经济弱势社区。在案例 B（城市出行优先）中，人口密度被确定为基础设施需求的首要驱动因素，而电动汽车拥有量仍是最不重要的因素，采用 $O_b = [3,1,6,9]$ 和 $O_w = [5,9,2,1]$，体现了一种优先考虑服务需求旺盛的高密度城市区域的策略。案例 C（出行正义导向）则将专家的关注重点转向公共交通可达性，将其列为最重要的评判标准，同时再次将电动汽车拥有量列为最不重要因素，采用 $O_b = [6,3,1,9]$ 和 $O_w = [2,5,9,1]$。该案例体现了旨在支持依赖公共交通人群、改善公平出行结果的政策目标。最后，案例 D（电动汽车普及准备度）体现了一种市场驱动的规划视角，在这种视角下，电动汽车拥有量被视为

最重要因素，收入中位数则为最不重要因素，采用 $O_b = [9,3,6,1]$ 和 $O_w = [1,5,2,9]$，以快速部署为目标，面向近期采用潜力较大的区域。由 BWM 推导的因素权重 θ_i反映了政策制定者和专家对各规划情景中每项因素赋予的相对重要性，汇总于 表 2。

表 2：BWM 推导的权重（θ_i），涵盖四种专家情景下的社会经济因素

Case	权重：收入中位数 θ_1	权重：人口密度 θ_2	权重：公共交通可达性 θ_3	权重 电动汽车拥有量 θ_4
A	0.580	0.260	0.096	0.063
B	0.261	0.568	0.110	0.061
C	0.109	0.264	0.566	0.062
D	0.059	0.262	0.103	0.576

表1中各区域的原始社会经济值通过方程 ((25) 进行归一化，以确保不同尺度之间具有可比性。随后，将所得归一化值与根据表2得出的权重分配 θ_i相结合，并通过方程 ((26) 计算最终的区域权重 μ_z 。这些权重表示各区域的相对社会优先级，并直接用于所提出的优化框架。表3展示了各情形下社会经济因素的归一化值及其权重。接下来，我们采用改进的 ESS 算法生成一组候选充电站位置。在步骤1中，我们生成起讫点对集合 Q。请注意，图10中的某些顶点对之间的距离大于 R；例如，$d(v_5, v_8) = 12$；因此，单一加油站无法覆盖该起讫点对之间的流量。同时，流量$f(v_5, v_8) = 0$；因此，无需考虑该起讫点对。根据 Q 的定义，本例中需要考虑的起讫点对共计104对，见附录 A（表 A.1 和表 A.2）。

表3：贝克萨尔县各划定区域的社会经济因素

Zone	标准化收入 (G_1^z)	归一化密度 (G_2^z)	归一化公共交通评分 (G_3^z)	标准化的电动汽车拥有量 (G_4^z)	Case	区域的权重 (μ_z)
1	0.67	0.73	0	0.79	A	0.63
2	0	0.27	0.5	1		0.18
3	0.85	1	1	0.24		0.86
4	0.22	0.53	0.5	0.45		0.34
5	1	0	1	0		0.67
6	0.44	0.93	0	0.55		0.53
1	0.67	0.73	0	0.79	B	0.64
2	0	0.26	0.5	1		0.26
3	0.86	1	1	0.24		0.92
4	0.23	0.53	0.5	0.44		0.44

5	1	0	1	0		0.37
6	0.45	0.93	0	0.55		0.68
1	0.67	0.73	0	0.79	C	0.31
2	0	0.26	0.5	1		0.41
3	0.86	1	1	0.24		0.94
4	0.23	0.53	0.5	0.44		0.47
5	1	0	1	0		0.65
6	0.45	0.93	0	0.55		0.33
1	0.67	0.73	0	0.79	D	0.68
2	0	0.26	0.5	1		0.70
3	0.86	1	1	0.24		0.55
4	0.23	0.53	0.5	0.44		0.46
5	1	0	1	0		0.16
6	0.45	0.93	0	0.55		0.59

在步骤2中，对于每条边 $(v_a, v_b) \in E$，我们考虑每个起讫点对 $q(v_i, v_j) \in Q$，并找出相应的端点集合 $EP(v_i, v_j; v_a, v_b)$。为说明这一过程，我们以边 (v_{16}, v_{17}) 和起讫点对 $q(v_{16}, v_{17})$ 为例；在此情形下，$d(v_i, v_a) = d(v_{16}, v_{16}) = 0$，且 $d(v_j, v_b) = d(v_{17}, v_{17}) = 0$。对于类型1情况（a）行程，使用方程 ((6)：

$$\gamma(v_{16}; v_{16}, v_{17}) = \min\{5 - d(v_{16}, v_{16}), d(v_{16}, v_{17})\} = \min\{5 - 0,5\} = 5,$$
$$\gamma(v_{17}; v_{17}, v_{16}) = \min\{5 - d(v_{17}, v_{17}), d(v_{16}, v_{17})\} = \min\{5 - 4,5\} = 5.$$

因此，$RS_1^{16}(v_{16}, v_{17}; v_{16}, v_{17}) = \{x \in (v_{16}, v_{17}) | l(v_{16}, x) \leq 5$ 和 $l(v_{17}, x) \leq 5\}$。整个边对于起讫点对 $q(v_{16}, v_{17})$ 来说都是加油区段；因此，无需在边（v_{16}, v_{17}）上为该起讫点对寻找其他加油区段。

现在，我们来考虑起讫点对 $q(v_{16}, v_{18})$；在这种情况下，$d(v_i, v_a) = d(v_{16}, v_{16}) = 0$ 和 $d(v_j, v_b) = d(v_{17}, v_{18}) = 4$。使用方程（6）处理类型1情况（a）行程：

$$\gamma(v_{16}; v_{16}, v_{17}) = \min\{5 - d(v_{16}, v_{16}), d(v_{16}, v_{17})\} = \min\{5 - 0,5\} = 5,$$
$$\gamma(v_{18}; v_{17}, v_{16}) = \min\{5 - d(v_{18}, v_{17}), d(v_{16}, v_{17})\} = \min\{5 - 4,5\} = 1.$$

因此，$RS_1^{16}(v_{16}, v_{18}; v_{16}, v_{17}) = \{x \in (v_{16}, v_{17}) | l(v_{16}, x) \leq 5$ 和 $l(v_{17}, x) \leq 1\}$。该加油区段由沿边 (v_{16}, v_{17}) 的一条线段组成，从 v_{17} 开始，长度为 1，并具有两个端点，如图11所示。

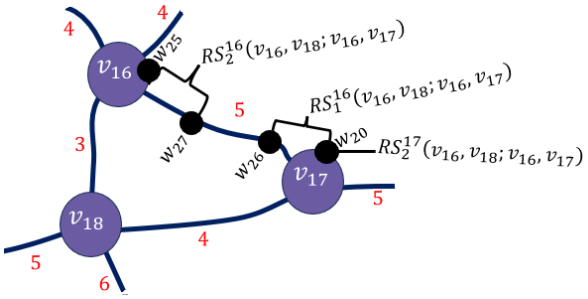

图11：起讫点对 $q(v_{16},\ v_{18})$ 在边 $(v_{16},\ v_{17})$ 的加油集合

现在，我们求出与类型 1 情形 (b) 行程相关联的加油区段。这里，$d(v_i, v_b) = d(v_{16}, v_{17}) = 5$，$d(v_j, v_a) = d(v_{18}, v_{16}) = 3$，然后对类型 1 情形 (b) 行程使用方程 (6)：

$$\gamma(v_{16}; v_{17}, v_{16}) = \min\{5 - d(v_{16}, v_{17}), d(v_{16}, v_{17})\} = \min\{5 - 5, 5\} = 0,$$

$$\gamma(v_{18}; v_{16}, v_{17}) = \min\{5 - d(v_{18}, v_{16}), d(v_{16}, v_{17})\} = \min\{5 - 3, 5\} = 2.$$

因此，$RS_1^{17}(v_{16}, v_{18};\ v_{16}, v_{17}) = \{x \in (v_{16}, v_{17}) | l(v_{17}, x) \le 0 \text{ 和 } l(v_{16}, x) \le 2\} = \emptyset$。对于起讫点对 $q(v_{16}, v_{18})$ 之间的类型 1 情形 (b) 行程，边 (v_{16}, v_{17}) 上没有加油区段。接下来，我们使用方程 ((9-(10))，求出类型 2 情形 (a) 行程的加油区段，如下所示：

$$\delta^{16}(v_{16}, v_{18}; v_{16}, v_{17}) = \min\{5 - \max\{d(v_{16}, v_{16}), d(v_{18}, v_{16})\}, l(v_{16}, v_{17})\} = \min\{5 - \max\{0,3\},5\} = 2,$$

$$RS_2^{16}(v_{16}, v_{18}; v_{16}, v_{17}) = \{x \in (v_{16}, v_{17}) | l(v_{16}, x) \le 2\},$$

因此，类型 2 情形 (a) 加油区段由一条长度为 2 个单位、从 v_{16} 开始的线段构成。接下来，求出类型 2 情形 (b) 行程的加油区段：

$$\delta^{17}(v_{16}, v_{18}; v_{16}, v_{17}) = \min\{5 - \max\{d(v_{16}, v_{17}), d(v_{18}, v_{17})\}, l(v_{16}, v_{17})\} = \min\{5 - \max\{5,4\},5\} = 0,$$

$$RS_2^{17}(v_{16}, v_{18}; v_{16}, v_{17}) = \{x \in (v_{16}, v_{17}) \mid l(v_{17}, x) \le 0\}.$$

类型 2 情形 (b) 加油区段由顶点 v_{17} 处的单个点组成。同样地，对网络中的其余起讫点对和边进行分析。在步骤 3 中，将所有边上的端点集合 $(v_a、\ v_b) \in E$ 合并。该示例的完整端点集合及其在网络中的位置如 图 12 所示。 表 列出了改进的 ESS 算法在 Bexar县网络各区域内确定的潜在充电站位置。

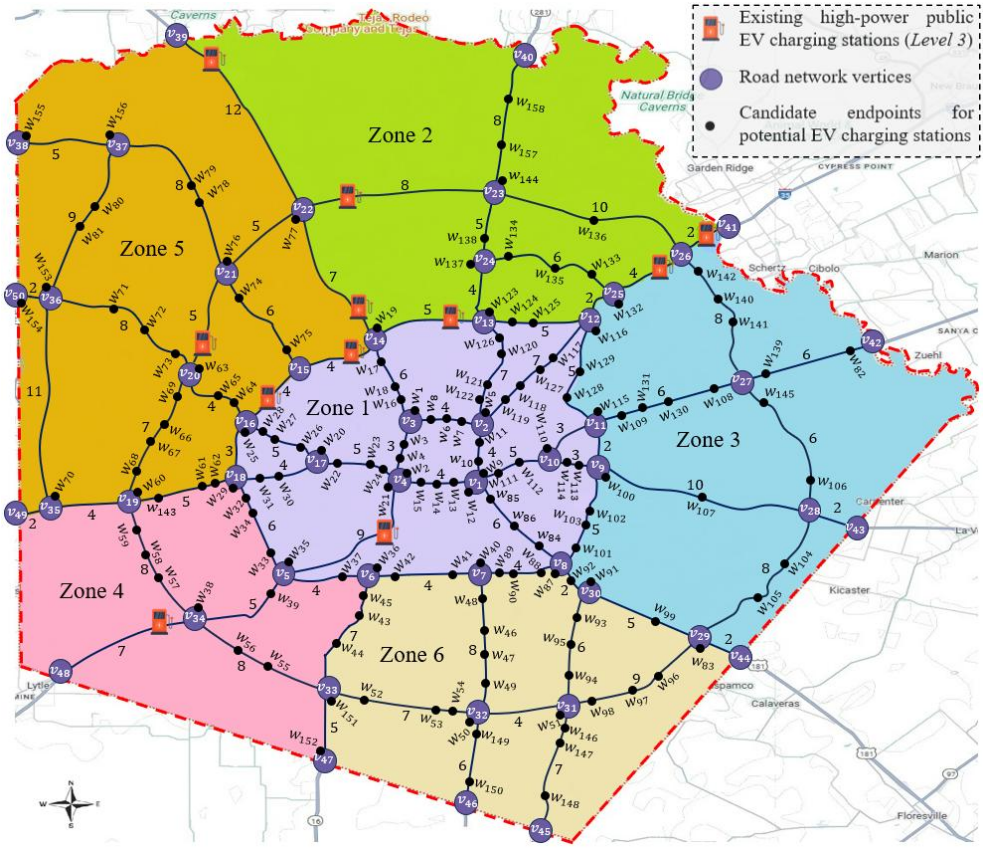

图 12：贝克萨尔县各社会经济分区的完整端点集合

表4：Bexar县网络中各区域内的潜在充电站位置

Zone	区域 z 内的候选位置集合
1	$w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8, w_9, w_{10}, w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}, w_{15}, w_{16}, w_{17}, w_{18}, w_{20}, w_{21}, w_{22}, w_{23}, w_{24}, w_{26}, w_{27}, w_{28}, w_{30}, w_{31}, w_{84}, w_{85}, w_{86}, w_{110}, w_{111}, w_{112}, w_{113}, w_{114}, w_{117}, w_{118}, w_{119}, w_{120}, w_{121}, w_{122}, w_{126}, w_{127}$
2	$w_{19}, w_{77}, w_{116}, w_{123}, w_{124}, w_{125}, w_{132}, w_{133}, w_{134}, w_{135}, w_{136}, w_{137}, w_{138}, w_{144}, w_{157}, w_{158}$
3	$w_{100}, w_{101}, w_{102}, w_{103}, w_{104}, w_{105}, w_{106}, w_{107}, w_{108}, w_{109}, w_{115}, w_{128}, w_{129}, w_{130}, w_{131}, w_{139}, w_{140}, w_{141}, w_{142}, w_{145}, w_{82}$
4	$w_{29}, w_{32}, w_{33}, w_{34}, w_{35}, w_{36}, w_{37}, w_{38}, w_{39}, w_{43}, w_{44}, w_{45}, w_{55}, w_{56}, w_{57}, w_{58}, w_{59}, w_{60}, w_{61}, w_{62}, w_{70}, w_{143}, w_{151}, w_{152}$
5	w_{25}, w , , ,

权重。第二阶段增设移动充电站，以应对时变需求变化并提高解的灵活性。这些结果共同表明，在不同权重方案下实现了效率、公平与适应性之间的平衡。

5.3.1. 第一阶段：*FCS* 分配

在第一阶段，优化模型确定了在四种加权情形（A-D）下部署固定充电站最合适的端点。各情形所选端点列于表，其空间分布如图13 和附录 B（图 B.1、图 B.2和图 B.3）所示，其中蓝色电动汽车充电站符号表示新建固定充电站的所选端点。

Ta表5：四种加权情形（A–D）下FCS分配的所选端点

Case	数量 FCSs	最优端点位置	分配区域	流量覆盖值
A	10	$w_{17}, w_{53}, w_{62}, w_{76}, w_{84}, w_{94}, w_{97}, w_{115}, w_{121}, w_{140}$	z_1,z_3,z_4,z_5,z_6	582.8
B		$w_{32}, w_{40}, w_{52}, w_{77}, w_{84}, w_{93}, w_{97}, w_{115}, w_{121}, w_{141}$	z_1,z_2,z_3,z_4,z_6	597.6
C		$w_{31}, w_{41}, w_{53}, w_{76}, w_{84}, w_{95}, w_{97}, w_{121}, w_{128}, w_{141}$	z_1,z_3,z_5,z_6	584.1
D		$w_{18}, w_{32}, w_{52}, w_{77}, w_{84}, w_{95}, w_{97}, w_{115}, w_{121}, w_{141}$	z_1,z_2,z_3,z_4,z_6	545.25

在案例 A（图13）中，优化模型将端点分配至区域 1、3、4、5 和 6，并在经济欠发达和人口稠密的地区提供更高的覆盖。这种空间分布体现了公平导向加权方案。尽管总流量覆盖（582.8）低于其他情形，但该方案减少了网络中的空间差异。案例 B、C 和 D 的结果及空间分布见附录 B。

5.3.2. 第二阶段：移动充电站部署

在确定固定充电站后，第二阶段部署移动充电站，以弥补覆盖缺口并应对需求变化。为反映充电需求的变化，出行流量按动态方式建模，涵盖四个时段和三种需求情景：高峰期（S_1，$P_1 = 0.2$）、平峰期（S_2，$P_2 = 0.5$）和非高峰期（S_3，$P_3 = 0.2$）。在四种加权案例（A-D）下，本阶段评估政策对移动充电站选址的影响。研究考虑的部署预算足以配置至多 10 个移动充电站。表 展示了公平导向规划（案例 A ）情景下移动充电站的详细时空分配和运行计划。在此情景中，移动充电站主要部署在低收入、高需求区域，例如区域 1、3 和 4，这些区域的固定充电容量有限。各设备在服务和充电模式之间循环切换。区域 2 未分配任何设备，这反映出该区域收入相对较高且需求强度较低。结果和

其余三个政策案例——城市出行优先（案例 B）、出行正义导向（案例 C）和电动汽车普及准备度（案例 D）——的运行计划见附录 C，表 C.1。这些案例通过展示所提框架在不同战略目标和需求情景下的灵活性，印证了案例 A 的研究发现，并进一步证实了模型的稳健性及其政策意义。

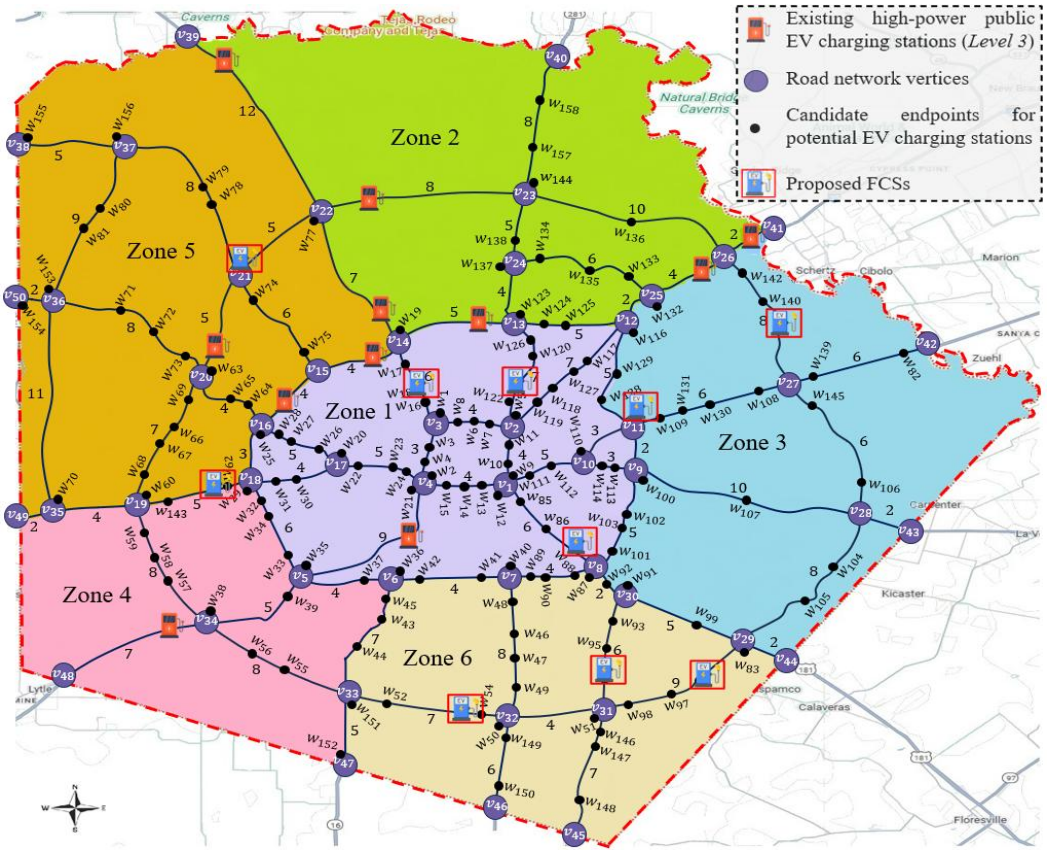

图13：案例 A 下的固定充电站分配：公平导向规划

案例 A 中观察到的协调式服务—充电循环，体现了该模型在公平导向目标下跨多个时间段管理移动充电站运营的能力。如图14所示，移动充电站在 6 个区域和 4 个时间段内交替采用服务和充电模式，服务部署集中在需求较高、收入较低的地区，例如区域 1、3 和 4。移动充电站不会在连续的服务时段内持续运行，而不在附近的固定充电站再充电，从而确保能源可行性，同时限制不必要的重新部署。需求较低且社会经济地位较高的区域（如区域 2）不会获得部署。这种时空调度展示了优化框架如何协同协调服务提供、再充电和重新部署，以平衡公平优先事项、需求变化和运营约束。

表 6：四种加权情形下移动充电站的时空分配与运行计划

Case ID	Destination	时间段 1			时间段 2			时间段 3			时间段 4		
		Pending Passengers	Vacant Zone	Operation Mode	Pending Passengers	Vacant Zone	Operation Mode	Pending Passengers	Vacant Zone	Operation Mode	Pending Passengers	Vacant Zone	Operation Mode
A	M_1	W_{84}	z1	充电	W_{2}	z1	发球	W_{84}	z1	充电	W_{87}	z6	发球
	M_2	W_{29}	z4	发球	W_{62}	z4	充电	W_{29}	z4	发球	W_{62}	z4	充电
	M_3	E_3	z3	充电	W_{75}	z5	发球	E_3	z3	充电	W_{25}	z5	发球
	M_4	W_{87}	z6	发球	W_{84}	z1	充电	W_{87}	z6	发球	W_{84}	z1	充电
	M_5	W_{53}	z6	充电	W_{149}	z6	发球	W_{53}	z6	充电	W_{149}	z6	发球
	M_6	W_{62}	z4	充电	W_{29}	z4	发球	W_{62}	z4	充电	W_{60}	z4	发球
	M_7	W_{84}	z1	充电	W_{87}	z6	发球	W_{84}	z1	充电	W_{99}	z6	发球
	M_8	W_{110}	z1	发球	W_{115}	z3	充电	W_{109}	z3	发球	W_{115}	z3	充电
	M_9	W_{115}	z3	充电	W_{109}	z3	发球	W_{115}	z3	充电	W_{109}	z3	发球
	M_{10}	W_{25}	z5	发球	E_3	z3	充电	W_{25}	z5	发球	E_3	Z3	充电

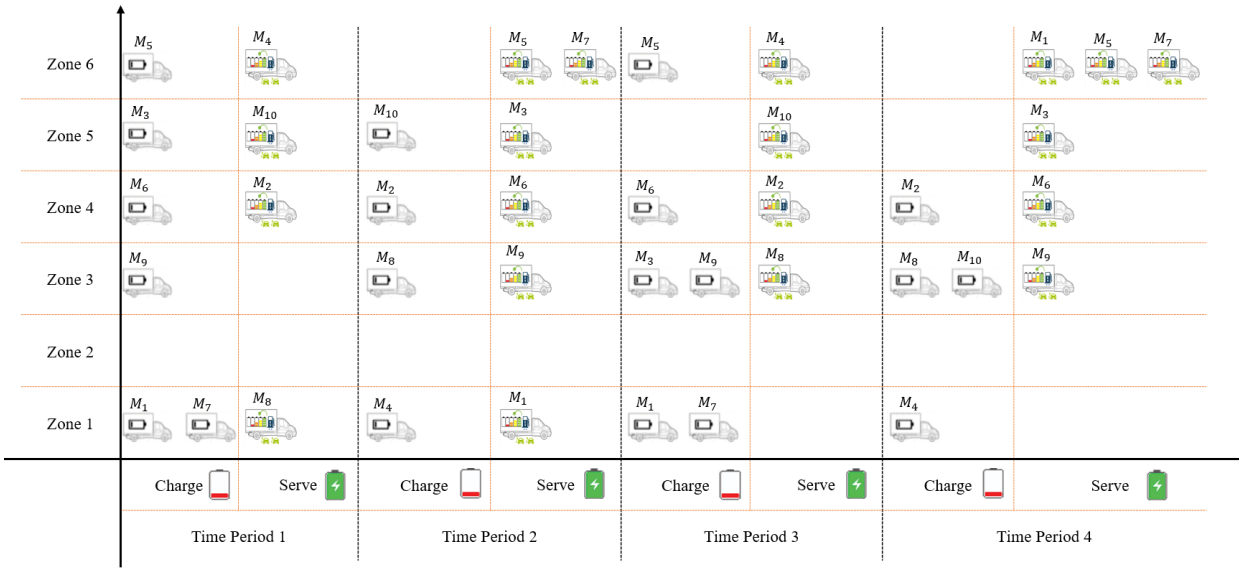

图14：案例 A（公平导向规划）下，10 个移动充电站在六个区域、四个时间段内的时序部署

表汇总了四种政策情景下的系统性能，同时纳入社会经济效益和重新部署成本。总效益按每单位覆盖需求 ε =$10 的社会经济价值计算，体现电动汽车充电带来的综合经济回报，以及减排和可达性提升等相关社会效益。重新部署成本设为每

英里，用于将移动充电站从一个地点移至另一个地点，代表重新部署设备以维持服务连续性的运营费用。

表7：四种不同加权情形（A-D）下的系统性能指标)

情形编号	目标函数数值	社会经济总量收益	重新部署成本
A	$ 8,008.62	$ 9,208.63	$ 1,200
B	$ 4,149.70	7,089.70 美元	2,940 美元
C	7,203.88 美元	8,843.88 美元	1,640 美元
D	3,659.34 美元	$ 6,019.34	$ 2,360

在四种情形中，案例 A（公平导向规划）的总体目标值最高（$8,008.62），总效益也最高（$9,208.63）。这表明，优先服务低收入、高需求区域，能够以相对较低的搬迁成本（$1,200）带来更大的全系统效益。案例 C（出行正义导向）位居第二，在社会可达性与运营效率之间实现了平衡。其次是案例 B（城市出行优先），由于在密集的城市走廊中频繁重新部署移动充电站，搬迁成本最高（$2,940）。案例 D（电动汽车普及准备度）聚焦于高收入、高汽车拥有率区域，因此公平性影响较小，同时搬迁成本处于中等水平；其效益（$6,019.34）和目标值均为最低。总体而言，这些结果表明，社会导向政策（案例 A 和 C）能够以较少的重新部署实现更高的系统净绩效，证实该模型能够兼顾经济效率与公平的服务供给。

6. 结论

本文提出了一种两阶段随机优化框架，通过协调使用固定式和移动式充电站，实现电动汽车充电基础设施的公平、韧性部署。该框架将固定充电站的长期规划决策与移动充电站部署的短期运营决策分开，从而兼顾空间公平性考量和时间需求变化。第一阶段利用社会经济权重优先服务服务不足区域和高需求区域，构建稳定的固定充电站基准网络；同时，基于改进型 ESS 算法的预处理步骤可减少冗余并提高计算效率。第二阶段则在满足运营可行性和能量平衡约束的前提下，跨多个时段动态重新分配移动充电站，以增强系统适应性。

在真实城市网络上开展的计算实验表明，不同的规划优先级会在覆盖、搬迁成本和公平性结果之间形成不同的权衡。以公平为重点以及出行正义导向的政策能够以更少的移动充电站迁移实现更高的系统净效益，这表明社会导向规划策略可以在不带来过高运营成本的情况下提升整体绩效。相比之下，优先考虑现有采用潜力的市场驱动策略

会产生较低的公平性影响和较低的全系统效益。这些结果凸显了将社会经济因素直接纳入基础设施规划模型的价值，并说明移动充电如何与固定资产互补，从而在需求不确定且分布不均的情况下提升韧性。

未来研究可以通过纳入可变充电价格来扩展这一框架，以反映随时间变化的费率和用户价格敏感度；还可以考虑不同车辆的续航里程，以提高资源分配准确性。对固定式和移动式充电站的容量限制进行建模，可明确呈现高需求条件下的排队效应和充电站利用率。纳入电网感知型运营约束（包括电力可用性以及与能源供应商的协调），则可进一步提升模型的现实性。综合而言，这些扩展将增强该框架在不确定性下，为大型电动汽车充电基础设施的政策分析和长期投资规划提供支持的能力。

数据可用性

附录列出了优化模型所用随机生成数据的参数值和分布详情。有关仿真框架的信息，请参阅原始引文。

参考文献

1. Haas, T. 和 *H. Sander*，《欧盟交通运输脱碳：排放性能标准与欧洲绿色协议的前景》。发表于《可持续性》，*2020*年。*12(20)*：第*8381*页。*2. (EPA)*，美国环境保护署。交通运输温室气体排放速览。2025 6, 2025 *6*月，引用于[2025 3, 2025] *7*月；来源：*https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions*。*3. Ullah, I.* 等，《电动汽车充电基础设施规划：综述》。发表于《国际绿色能源杂志》，*2023*年。*21(7)*：第*1710–1728*页。*4. Dwortzan, M.*《汽车和轻型卡车电动化，以实现巴黎气候目标》。2021 [引用于*2021*年；来源：*https://news.mit.edu/2021/electrifying-cars-light-trucks-meet-paris-climate-goals- 0810?utm_source=chatgpt.com*。*5. (UNFCCC)*，联合国气候变化框架公约。《巴黎协定》。 2015 [引用于*2015*年；来源：*https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement*。*6. IEA*（*2023*），*G.E.O.*，国际能源署，巴黎。*2023*年：*https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023*，许可协议：知识共享署名*4.0*国际许可协议。*7. Guo, S.* 和 *H. Zhao*，《基于可持续性视角采用模糊逼近理想解排序法进行电动汽车充电站最优选址》。发表于《应用能源》，*2015*年。*158*：第*390–402*页。*8. Leijon, J.*，《电动汽车充电策略与电池老化：综述》。发表于《能源战略评论》，*2025*年。*57*：第*101641*页。*9. Andrenacci, N.*、*R. Ragona* 和 *G. Valenti*，《大都市地区电动汽车充电站最优布局的需求侧方法》。发表于《应用能源》，*2016*年。*182*：第*39–46*页。*10. Arias, M.B.* 和 *S. Bae*，《基于大数据技术的电动汽车充电需求预测模型》。发表于《应用能源》，*2016*年。*183*：第*327–339*页。*11. Wang, Y.* 等，《预算约束下高速公路网络快速充电站的选址与定容》。发表于《应用能源》，*2018*年。*228*：第*1255–1271*页。*12. Ermagun, A.* 和 *J. Tian*，《充电不平等：电动汽车充电站社会、经济和环境相关因素的全国性研究》。发表于《能源研究与社会科学》，*2024*年。*115*：第*103622*页。*13. Neto, R.C.* 等，《移动充电站：变换器拓扑结构与市场解决方案的综合综述》。发表于《能源》，*2024*年。*17(23)*：第*5931*页。*14. Golsefidi, A.H.* 等，《随机环境下大型固定式和移动式充电基础设施的增量扩展：一种新型基于图的*Benders*分解方法》。发表于《应用能源》，*2025*年。*380*：第*124985*页。*15. Rezaei, J.*，《最佳-最劣多准则决策法》。发表于《欧米伽》，*2015*年。*53*：第*49–57*页。*16. Abbaas, O.* 和 *J.A. Ventura*，《一般网络连续偏差流加注站选址问题的边扫描法》。发表于《网络》，*2022*年。*79(3)*：第*264–291*页。*17. Egbue, O.* 和 *S. Long*，《电动汽车普及应用的障碍：消费者态度与认知分析》。发表于《能源政策》，*2012*年。*48*：第*717–729*页。*18. Sierzchula, W.* 等，《财政激励及其他社会经济因素对电动汽车普及的影响》。发表于《能源政策》，*2014*年。*68*：第*183–194*页。*19. Mersky, A.C.* 等，《激励措施对挪威电动汽车普及的有效性》。发表于《交通研究*D*辑：交通与环境》，*2016*年。*46*：第*56–68*页。*20. Taghizad-Tavana, K.* 等，《能源系统中的电动汽车综合综述：与可再生能源、充电等级、不同类型及标准的整合》。发表于《能源》，*2023*年。*16(2)*。

21. Xi, X.、*R. Sioshansi* 和 *V. Marano*，《公共电动汽车充电基础设施选址的仿真—优化模型》。发表于《交通研究*D*辑：交通与环境》，*2013*年。*22*：第*60–69*页。*22. Kadri, A.A.* 等，《电动汽车充电站选址的多阶段随机整数规划方法》。发表于《计算机与运筹研究》，*2020*年。*117*。*23. Sun, X.-H.*、*T. Yamamoto* 和 *T. Morikawa*，《纯电动汽车用户的快速充电站选择行为》。发表于《交通研究*D*辑：交通与环境》，*2016*年。*46*：第*26–39*页。*24. Ito, N.*、*K. Takeuchi* 和 *S. Managi*，《替代燃料汽车基础设施投资的支付意愿》。发表于《交通研究*D*辑：交通与环境》，*2013*年。*18*：第*1–8*页。*25. Robinson, A.P.* 等，《电动汽车驾驶员充电需求曲线分析及其对电动汽车出行碳含量的后续影响》。发表于《能源政策》，*2013*年。*61*：第*337–348*页。*26. Abid, M.* 等，《电动汽车路径规划与充电：文献综述》。发表于《能源报告》，*2022*年。*8*：第*556–578*页。*27. He, F.* 等，《插电式混合动力汽车公共充电站的最优布局》。发表于《交通运输研究*B*辑：方法论》，*2013*年。*47*：第*87–101*页。*28. Morrissey, P.*、*P. Weldon* 和 *M. O'Mahony*，《未来常规与快速充电基础设施规划：电动汽车充电行为分析》。发表于《能源政策》，*2016*年。*89*：第*257–270*页。*29. Hipolito, F.*、*C. Vandet* 和 *J. Rich*，《电动汽车车队的充电、稳态荷电状态与储能分布》。发表于《应用能源》，*2022*年。*317*：第*119065*页。*30. Ahmadi, M.*、*N. Mithulananthan* 和 *R. Sharma*。《电动汽车快速充电站拓扑结构综述》。载于*2016*年*IEEE*电力系统技术国际会议（*POWERCON*）。*2016*年。*IEEE*。*31. Medina, G.M.*、*K.K. Castillo-Villar* 和 *O. Abbaas*，《电动汽车（*EV*）车队充电位置分配优化模型》。发表于《*IEEE Access*》，*2025*年。*32. Kunith, A.*、*R. Mendelevitch* 和 *D. Goehlich*，《城市公交网络电气化——快速充电电动公交系统充电基础设施经济高效布设与电池容量配置的优化模型》。发表于《国际可持续交通期刊》，*2017*年。*11(10)*：第*707–720*页。*33. Mirchandani, P.*、*J. Adler* 和 *O.B.G. Madsen*，《采用电池更换基础设施的电动汽车车队面临的新物流问题》。发表于《普罗塞迪亚：社会与行为科学》，*2014*年。*108*：第*3–14*页。*34. Hodgson, M.J.*，《流量捕获选址—分配模型》。发表于《地理分析》，*1990*年。*22(3)*：第*270–279*页。*35. Kuby, M.* 和 *S. Lim*，《替代燃料汽车的流量加油站选址问题》。发表于《社会经济规划科学》，*2005*年。*39(2)*：第*125–145*页。*36. Hof, J.*、*M. Schneider* 和 *D. Goeke*，《利用*AVNS*算法求解容量受限电动汽车电池换电站选址—路径问题及带中间停靠点的车辆路径问题》。发表于《交通运输研究*B*辑：方法论》，*2017*年。*97*：第*102–112*页。*37. Yang, J.*、*F. Guo* 和 *M. Zhang*，《兼顾客户满意度的换电/充电站网络最优规划》。发表于《交通研究*E*辑：物流与交通评论》，*2017*年。*103*：第*174–197*页。*38. Tu, W.* 等，《电动出租车充电站选址优化：时空需求覆盖方法》。发表于《交通研究*C*辑：新兴技术》，*2016*年。*65*：第*172–189*页。*39. Capar, I.* 等，《替代燃料站选址的弧覆盖—路径覆盖公式与战略分析》。发表于《欧洲运筹学杂志》，*2013*年。*227(1)*：第*142–151*页。

*40. Lee, C.*与*J. Han*，概率旅行范围下电动汽车充电站选址问题的*Benders-and-Price*方法。《交通研究*B*辑：方法论》，*2017*年。*106: p. 130-152*。*41. Chung, S.H.*与*C. Kwon*，电动汽车充电站选址的多周期规划：以韩国高速公路为例。《欧洲运筹学杂志》，*2015*年。*242(2): p. 677-687*。*42. Li, Y.*等，基于最优能耗的电动汽车交通流跟驰模型。《物理学*A*：统计力学及其应用》，*2019*年。*533*。*43. Cai, H.*等，利用出租车车队大数据驱动的出行模式在北京进行公共电动汽车充电站选址。《交通研究*D*辑：交通与环境》，*2014*年。*33: p. 39-46*。*44. Kweon, S.J.*、*S.W. Hwang*与*J.A. Ventura*，树状交通网络上替代燃料加注站的连续偏流选址问题。《先进交通杂志》，*2017*年。*2017(1): p. 1705821*。*45. Nayeem, M.K.*等，车队运营中加注站选址问题的有限支配集。*arXiv*预印本 *arXiv:2509.11441*，*2025*年。*46. Abbaas, O.*与*J.A. Ventura*，一般网络上偏流加注站选址问题的字典序优化方法。《优化快报》，*2022*年。*16(3): p. 953-982*。*47. Gavranović, H.*等，优化*EŞARJ*的电动汽车充电站网络。《计算机科学程序汇刊》，*2014*年。*31: p. 15-21*。*48. Funke, S.*、*A. Nusser*与*S. Storandt*，电动汽车充电站选址：无需绕行！《人工智能研究杂志》，*2015*年。*53: p. 633-658*。*49. Funke, S.*、*A. Nusser*与*S. Storandt*。电动汽车充电站选址：允许小幅绕行。载于自动规划与调度国际会议论文集。*2016*年。*50. Ge, S.*、*L. Feng*与*H. Liu*。基于电网分区法的电动汽车充电站规划。载于*2011*年国际电气与控制工程会议。*2011*年。*IEEE*。*51. Csonka, B.*与*C. Csiszár*，电动汽车充电基础设施选址的确定。《交通研究程序汇刊》，*2017*年。*27: p. 768-775*。*52. Arslan, O.*与*O.E. Karaşan*，面向插电式混合动力汽车的充电站选址问题的*Benders*分解方法。《交通研究*B*辑：方法论》，*2016*年。*93: p. 670-695*。*53. Jing, W.*等，电动汽车充电设施选址设计：一种路径距离约束随机用户均衡方法。《先进交通杂志》，*2017*年。*2017: p. 1-15*。*54. Dong, J.*、*C. Liu*与*Z. Lin*，促进纯电动汽车发展的充电基础设施规划：一种利用多日出行数据的基于活动的方法。《交通研究*C*辑：新兴技术》，*2014*年。*38: p. 44-55*。*55. Wang, Y.-W.*与*C.-C. Lin*，电池驱动电动汽车运输中多种类型充电站的选址。《交通研究*E*辑：物流与交通评论》，*2013*年。*58: p. 76-87*。*56. González, J.*等，考虑驾驶员日常活动确定电动汽车充电点选址。《计算机科学程序汇刊》，*2014*年。*32: p. 647-654*。*57. Jia, L.*等。电动汽车充电站的最优选址与定容。载于*2012*年*IEEE*国际电动汽车会议。*2012*年。*IEEE*。*58. Wang, X.*等，城市公共汽车系统的电动汽车充电站选址。《*IEEE*智能交通系统汇刊》，*2017*年。*18(1): p. 128-139*。*59. Xu, M.*等，纯电动汽车用户的充电模式与选址联合选择模型。《交通研究*B*辑：方法论》，*2017*年。*103: p. 68-86*。*60. Yang, Y.*等，纯电动汽车驾驶员充电与路径选择行为建模。《交通研究*C*辑：新兴技术》，*2016*年。*65: p. 190-204*。

61. Chen, Z.、*F. He*与*Y. Yin*，交通网络中电动汽车充电车道的最优布局。《交通研究*B*辑：方法论》，*2016*年。*91: p. 344-365*。*62. Liu, H.*与*D.Z.W. Wang*，纯电动汽车多种类型充电设施的选址。《交通研究*B*辑：方法论》，*2017*年。*103: p. 30-55*。*63. He, F.*、*Y. Yin*与*J. Zhou*，在城市道路网络上部署电动汽车公共充电站。《交通研究*C*辑：新兴技术》，*2015*年。*60: p. 227-240*。*64. Nurre, S.G.*等，面向智能电网应用的插电式混合动力汽车（*PHEV*）换电站运营管理。《能源政策》，*2014*年。*67: p. 364-377*。*65. Guo, Z.*、*J. Deride*与*Y. Fan*，竞争性市场中快速充电站的基础设施规划。《交通研究*C*辑：新兴技术》，*2016*年。*68: p. 215-227*。*66. Kang, Q.*等，电池换电情景下电动汽车的集中式充电策略与调度算法。《*IEEE*智能交通系统汇刊》，*2016*年。*17(3): p. 659-669*。*67. Widrick, R.S.*、*S.G. Nurre*与*M.J. Robbins*，电动汽车电池换电站管理的最优策略。《交通科学》，*2018*年。*52(1): p. 59-79*。*68. Nazari-Heris, M.*等，迈向社会公平可及与电动汽车移动充电站：洛杉矶案例研究。《应用能源》，*2022*年。*311: p. 118704*。*69. Khan, H.A.U.*等，电动汽车充电基础设施的不公平可及性。《电力学报》，*2022*年。*35(3)*。*70. Jiao, J.*、*S.J. Choi*与*C. Nguyen*，迈向公平的交通电气化计划：测度得克萨斯州奥斯汀的公共电动汽车充电站可及性差异。《公共科学图书馆·综合》，*2024*年。*19(9): p. e0309302*。*71. Min, Y.*与*H.W. Lee*。电动汽车充电基础设施系统中清洁能源政策的社会公平。载于*2020*年建筑研究大会。*2020*年。美国土木工程师学会，弗吉尼亚州雷斯顿。*72. Hsu, C.-W.*与*K. Fingerman*，加利福尼亚州公共电动汽车充电器可及性的种族与收入差异。《交通政策》，*2021*年。*100: p. 59-67*。*73. Juhász, L.*与*H.H. Hochmair*，美国公共电动汽车充电基础设施位置与使用的时空分析。*GI_Forum*，*2023*年。*1: p. 83-100*。*74. Carlton, G.J.*与*S. Sultana*，电动汽车充电站可及性与土地利用聚类：芝加哥地区案例研究。《城市交通学报》，*2022*年。*2*。*75. Juhász, L.*与*H.H. Hochmair*，美国公共电动汽车充电基础设施位置与使用的时空分析。*2023*年。*76. Canepa, K.*、*S. Hardman*与*G. Tal*，加利福尼亚州弱势社区插电式电动汽车普及的早期观察。《交通政策》，*2019*年。*78: p. 19-30*。*77. Hardman, S.*等，向电动汽车转型中的公平视角。《麻省理工学院科学政策评论》，*2021*年。*2*。*78. Hopkins, E.*等，电动汽车充电基础设施的公平部署能否实现？《可再生与可持续能源评论》，*2023*年。*182*。*79. Zhou, Y.*等，利用制图工具优先将电动汽车充电器效益分配给服务不足的社区。*2022*年，阿贡国家实验室（*ANL*），伊利诺伊州阿贡（美国）。*80. Nazari-Heris, M.*、*S. Asadi*与*B. Mohammadi-Ivatloo*，电力能源系统中电动汽车技术—社会—经济研究综述。《*e-Prime*：电气工程、电子与能源进展》，*2024*年。*10*。*81. Zarazua de Rubens, G.*等，电动出行的市场论证：探究大规模普及的电动汽车商业模式。《能源》，*2020*年。*194*。*82. Daina, N.*、*J.W. Polak*与*A. Sivakumar*，电动汽车充电行为的显性与潜在预测因素。《交通研究记录：交通研究委员会期刊》，*2019*年。*2502(1): p. 116-123*。*83. Davis, A.W.*与*G. Tal*，探究电动汽车非居家充电需求对轻型汽车车队构成与使用变化的敏感性：加利福尼亚州案例研究

2030.《交通研究记录：交通研究委员会期刊》，2021年。2675(10)：第1384-1395页。84. Golsefidi, A.H.等，随机环境下大型固定式和移动式充电基础设施的增量扩展：一种新型基于图的Benders分解方法。《应用能源》，2025年。380。85. Qiao, D.、G. Wang和M. Xu，电动汽车移动充电服务优化。《交通运输快报》，2025年：第1-15页。86. Wang, F.等，考虑多时段随机用户均衡的电动汽车移动充电站选址优化。《可持续性》，2019年。11(20)。87. Atmaja, T.D.和M. Mirdanies，电动汽车移动充电站调度算法。《能源Procedia》，2015年。68：第326-335页。88. Afshar, S.等，电动汽车移动充电站——综述。《可再生与可持续能源评论》，2021年。152。89. He, K.等，高速公路上电动汽车固定式和移动式充电设施的协同规划。《IEEE智能交通系统汇刊》，2023年。24(9)：第10087-10098页。90. Kong, P.-Y，面向公共停车设施中电动汽车的自主机器人式移动充电器。《IEEE智能电网汇刊》，2019年。10(6)：第5952-5963页。91. Saboori, H.和S. Jadid，电力配电网络中移动式公用事业规模电池储能系统的优化调度。《储能杂志》，2020年。31。92. Afshar, S.等，城市区域电动汽车充电管理的移动充电站：以Chattanooga为例。《应用能源》，2022年。325。93. Zhang, Y.等，移动充电：城市区域电动汽车的一种新型充电系统。《应用能源》，2020年。278。94. Chauhan, V.和A. Gupta，移动充电站调度以实现电动汽车充电。载于：2018年第14届无线与移动计算、网络与通信国际会议（WiMob）。2018年。IEEE。95. Răboacă, M.-S.等，移动充电站临时位置的优化模型。《数学》，2020年。8(3)。96. Saboori, H.、S. Jadid和M. Savaghebi，将移动电池储能系统优化管理为自动驾驶、自供电的可移动充电站，以促进电动汽车普及。《能源》，2021年。14(3)。97. Saboori, H.和S. Jadid，集成移动电池的充电站：通过可再生能源弃电回收降低电动汽车充电队列和成本。《国际能源研究杂志》，2021年。46(2)：第1077-1093页。98. Jeon, S.和D.H. Choi，考虑配电系统运行条件的车载移动充电站优化能源管理框架。《传感器》（巴塞尔），2021年。21(8)。99. Beyazit, M.A.和A. Tascikaraoglu，配电网络中城市区域移动充电站的优化管理，载于《2022年智能能源系统与技术国际会议》（SEST）。2022年。第1-6页。100. Chen, H.等，物联网中移动充电站的动态充电优化。《IEEE Access》，2018年。6：第53509-53520页。101. Kabir, M.E.等，面向车对车能量传输的移动充电基础设施联合路由与调度。《IEEE智能车辆汇刊》，2021年。6(4)：第736-746页。102. Qureshi, U.、A. Ghosh和B.K. Panigrahi，考虑随机行驶时间的移动充电站调度与路径规划，以在时间窗内服务异质时空电动汽车充电请求。《IEEE工业应用汇刊》，2022年。58(5)：第6546-6556页。

*103. Liu, L.*等，通过对电动汽车网络中的可移动充电站进行分配重调度，实现充电费用最小化。《*IEEE*智能交通系统汇刊》，*2022*年。*23(10)*：第*17212-17223*页。*104. Cui, S.*等，基于电动汽车时空分布的多模式移动充电服务。《能源》，*2020*年。*198*。*105. Zhou, B.*等，用于电气化交通网络快速充电站规划的鲁棒机会约束规划方法。《应用能源》，*2020*年。*262*：第*114480*页。*106. Hosseini, M.*和*S.A. MirHassani*，不确定条件下的加注站选址问题。《交通研究*E*辑：物流与交通评论》，*2015*年。*84*：第*101-116*页。*107. Karuppiah, R.*、*M. Martín*和*I.E. Grossmann*，一种减少两阶段随机规划情景数量的简单启发式方法。《计算机与化学工程》，*2010*年。*34(8)*：第*1246-1255*页。*108. El-Sayed, M.*、*N. Afia*和*A. El-Kharbotly*，风险条件下正向—逆向物流网络设计的随机模型。《计算机与工业工程》，*2010*年。*58(3)*：第*423-431*页。*109. Dolatabadi, S.H.H.*等，利用电动汽车和可再生能源管理本地电力市场的随机博弈优化方法。《应用能源》，*2024*年。*368*：第*123518*页。*110. Nayeem, M.K.*和*O. Abbaas*，不确定性条件下优化寿命终止建筑的废墟管理，增强灾害韧性。《工业与生产工程学报》，*2024*年：第*1-16*页。*111. Yu, G.*等，商场停车场转型为电动汽车充电站的随机规划。《应用能源》，*2025*年。*379*：第*124894*页。*112. Kazemtarghi, A.*和*A. Mallik*，集成电池储能系统和光伏的电动汽车充电站电能采购两阶段随机规划方法。《电力系统研究》，*2024*年。*232*。*113. Schücking, M.*和*P. Jochem*，优化商业车队电动汽车成本的两阶段随机规划。《应用能源》，*2021*年。*293*。*114. Yin, Y.*等，综合选址—分配与疏散规划问题的两阶段可恢复鲁棒优化。《交通研究*B*辑：方法论》，*2024*年。*182*：第*102906*页。*115. Sun, H.*、*X. Yu*和*G. Bayraksan*，利用决策依赖型需求学习确定电动汽车充电站位置的情境随机优化。可从*SSRN 5078715*获取。*116. Sahinidis, N.V.*，不确定性优化：最新进展与机遇。《计算机与化学工程》，*2004*年。*28(6-7)*：第*971-983*页。*117. Mak, H.-Y.*、*Y. Rong*和*Z.-J.M. Shen*，电池换电电动汽车基础设施规划。《管理科学》，*2013*年。*59(7)*：第*1557-1575*页。*118. Jung, J.*等，考虑排队延误的电动出租车充电站随机动态行程拦截加油选址问题。《交通研究*C*辑：新兴技术》，*2014*年。*40*：第*123-142*页。*119. Yan, D.*等，并网光伏—电池充电站功率分配与电动汽车充电协调的两阶段方案。《*IEEE*工业信息学汇刊》，*2021*年。*17(10)*：第*6994-7004*页。*120. Tan, J.*和*W.-H. Lin*，一种用于电动汽车充电站选址的随机流量捕获选址分配模型。载于：第*17*届*IEEE*智能交通系统国际会议（*ITSC*）。*2014*年。*IEEE*。*121. Bhatti, S.F.*、*M.K. Lim*和*H.-Y. Mak*，结合需求学习的替代燃料站选址模型。《运筹学年鉴》，*2014*年。*230(1)*：第*105-127*页。*122. Marasciuolo, F.*等，直流微电网社区中电动汽车充电站集群的两阶段调度，载于《*2021*年*IEEE*环境与……国际会议》。

电气工程与2021年IEEE欧洲工业与商业电力系统会议（EEEIC / I&CPS Europe）。2021年。第1-6页。123. Davidov, S. 和 M. Pantoš, 《驾驶里程变异性对充电基础设施扩展规划最优方案的影响》。《能源》，2017年。141：第603-612页。124. De Vries, H. 和 E. Duijzer, 《将驾驶里程变异性纳入加油设施网络设计》。《欧米伽》，2017年。69：第102-114页。125. Kchaou-Boujelben, M. 和 C. Gicquel, 《在电池能量状态和功耗不确定的情况下确定电动汽车充电站的位置》。《计算机与工业工程》，2020年。149：106752。126. Xie, F. 等, 《纯电动汽车城际快速充电基础设施的长期战略规划》。《交通运输研究E辑：物流与交通评论》，2018年。109：第261-276页。127. Kabli, M. 等, 《电动汽车充电站扩展计划的随机规划方法》。《国际生产经济学杂志》，2020年。220：107461。128. Yıldız, B.、E. Olcaytu 和 A. Şen, 《具有随机需求和容量受限充电站的城市充电基础设施设计问题》。《交通研究B辑：方法论》，2019年。119：第22-44页。129. Tafakkori, K.、A. Bozorgi-Amiri 和 A. Yousefi-Babadi, 《不确定条件下的可持续广义加油站选址问题》。《可持续城市与社会》，2020年。63：102497。130. (EPA), E.P.A. 典型乘用车的温室气体排放。。

2025 31, 2025 3月 引[2025 31] 用日期：3月；来源：https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle。131. Hub, C.o.S.A.G. 社区概况地图。2024年（或网站上最新可见年份）[引用日期：2025年；来源：https://cosagis.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=184271 3 89748 5 6 1834d b e b 63 804 ba da a。132. District, N.E.I.S. 人口统计与边界。 2025 [引用日期：2025年；来源：https://www.neisd.net/Page/13067。133. PlugShare。查找电动汽车充电地点。 2025 [引用日期： 2025 2025]；来源：https://www.plugshare.com/。134. Martens, K., 《交通正义：设计公平交通系统》。2017年，纽约州纽约市：Routledge。135. Department, B.C.G. 贝尔县人口普查区。2022 [引用日期：2025年；来源：https://gis-bexar.opendata.arcgis.com/datasets/Bexar::bexar-county-census- tracts/explore?location=29.465165%2C-98.314781%2C11.62。136. Bureau, U.S.C. ACS表S1901：过去12个月的家庭收入中位数（按2022年通货膨胀调整的美元计）。2022 [引用日期：2025年；来源：https://data.census.gov/table/ACSST5Y2022.S1901?q=median+household+income&g=050XX00 US48029。137. UnitedStatesZipCodes.org。得克萨斯州贝克萨尔县邮政编码地图和数据。2025 [引用日期：2025年；来源：https://www.unitedstateszipcodes.org/tx-bexar-county/。138. Transit, V.M. VIA系统地图。2024 [引用日期：2025年；来源：https://www.viainfo.net/wp- content/uploads/2022/06/VIA-SystemMap-2024_0108-for-web.pdf。139. Policy, A.P. 州电动汽车注册数据。2025年，Atlas EV Hub：华盛顿特区。

附录 A。

表 A.1：网络中的起讫点对及未覆盖需求集。

网络中所有起讫点对的集合	现有站点覆盖的起讫点对
$q(v_1, v_2), q(v_1, v_4), q(v_1, v_8), q(v_1, v_{10}), q(v_2, v_3), q(v_2, v_{12}),$ $q(v_2, v_{13}), q(v_3, v_4), q(v_3, v_{14}), q(v_4, v_5), q(v_4, v_{17}), q(v_5, v_6),$ $q(v_5, v_{18}), q(v_5, v_{34}), q(v_6, v_7), q(v_6, v_{33}), q(v_7, v_8), q(v_7, v_{32}),$ $q(v_8, v_9), q(v_8, v_{30}), q(v_9, v_{10}), q(v_9, v_{11}), q(v_9, v_{28}), q(v_{10}, v_{11}),$ $q(v_{11}, v_{12}), q(v_{11}, v_{27}), q(v_{12}, v_{13}), q(v_{12}, v_{25}), q(v_{13}, v_{14}),$ $q(v_{13}, v_{24},), q(v_{14}, v_{15}), q(v_{14}, v_{22}), q(v_{15}, v_{16}), q(v_{15}, v_{21}),$ $q(v_{16}, v_{17}), q(v_{16}, v_{18}), q(v_{16}, v_{20}), q(v_{17}, v_{18}), q(v_{19}, v_{20}),$ $q(v_{19}, v_{34}), q(v_{19}, v_{35}), q(v_{20}, v_{21}), q(v_{20}, v_{36}), q(v_{21}, v_{22}),$ $q(v_{21}, v_{37}), q(v_{22}, v_{23}), q(v_{22}, v_{39}), q(v_{23}, v_{24}), q(v_{23}, v_{26}),$ $(v_{23}, v_{40}), q(v_{24}, v_{25}), q(v_{25}, v_{26}), q(v_{26}, v_{27}), q(v_{26}, v_{41}),$ $q(v_{27}, v_{28}), q(v_{27}, v_{42}), q(v_{28}, v_{29}), q(v_{28}, v_{43}), q(v_{29}, v_{30}),$ $(v_{29}, v_{31}), q(v_{29}, v_{44}), q(v_{30}, v_{31}), q(v_{31}, v_{32}), q(v_{31}, v_{45}),$ $q(v_{32}, v_{33}), q(v_{32}, v_{46}), q(v_{33}, v_{34}), q(v_{33}, v_{47}), q(v_{34}, v_{48}),$ $q(v_{35}, v_{36}), q(v_{35}, v_{49}), q(v_{36}, v_{37}), q(v_{36}, v_{50}), q(v_{37}, v_{38})$	$q(v_4, v_5), q(v_{13}, v_{14}), q(v_{14}, v_{15}),$ $q(v_{14}, v_{22}), q(v_{15}, v_{16}), q(v_{20}, v_{21}),$ $q(v_{22}, v_{23}), q(v_{22}, v_{39}), q(v_{25}, v_{26}),$ $q(v_{26}, v_{41}), q(v_{34}, v_{48})$

表 A.2：贝克萨尔县网络中各区域 z 的全部及未覆盖的 O-D 对子集。

Zone	区域 z 中所有起讫点对的集合	区域 z 中未覆盖的起讫点对集合
1	$q(v_1, v_2), q(v_1, v_4), q(v_1, v_8), q(v_1, v_{10}),$ $q(v_2, v_3), q(v_2, v_{12}), q(v_2, v_{13}), q(v_3, v_4),$ $q(v_3, v_{14}), q(v_4, v_5), q(v_4, v_{17}), q(v_9, v_{10}),$ $q(v_{10}, v_{11}), q(v_{16}, v_{17}), q(v_{17}, v_{18})$	$q(v_1, v_2), q(v_1, v_4), q(v_1, v_8), q(v_1, v_{10}),$ $q(v_2, v_3), q(v_2, v_{12}), q(v_2, v_{13}), q(v_3, v_4),$ $q(v_3, v_{14}), q(v_4, v_{17}), q(v_9, v_{10}), q(v_{10}, v_{11}),$ $q(v_{16}, v_{17}), q(v_{17}, v_{18})$
2	$q(v_{12}, v_{13}), q(v_{12}, v_{25}), q(v_{13}, v_{14}), q(v_{13}, v_{24},),$ $q(v_{14}, v_{22}), q(v_{22}, v_{23}), q(v_{22}, v_{39}), q(v_{23}, v_{24}),$ $q(v_{23}, v_{26}), q(v_{23}, v_{40}), q(v_{24}, v_{25}), q(v_{25}, v_{26}),$ $q(v_{26}, v_{41})$	$q(v_{12}, v_{13}), q(v_{12}, v_{25}), q(v_{13}, v_{24},), q(v_{23}, v_{24}),$ $q(v_{23}, v_{26}), q(v_{23}, v_{40}), q(v_{24}, v_{25})$
3	$q(v_8, v_9), q(v_8, v_{30}), q(v_9, v_{11}), q(v_9, v_{28}),$ $q(v_{11}, v_{12}), q(v_{11}, v_{27}), q(v_{26}, v_{27}), q(v_{27}, v_{28}),$ $q(v_{27}, v_{42}), q(v_{28}, v_{29}), q(v_{28}, v_{43}), q(v_{29}, v_{30}),$ $q(v_{29}, v_{44})$	$q(v_8, v_9), q(v_8, v_{30}), q(v_9, v_{11}), q(v_9, v_{28}),$ $q(v_{11}, v_{12}), q(v_{11}, v_{27}), q(v_{26}, v_{27}), q(v_{27}, v_{28}),$ $q(v_{27}, v_{42}), q(v_{28}, v_{29}), q(v_{28}, v_{43}), q(v_{29}, v_{30}),$ $q(v_{29}, v_{44})$
4	$q(v_5, v_6), q(v_5, v_{18}), q(v_5, v_{34}), q(v_6, v_{33}),$ $q(v_{18}, v_{19}), q(v_{19}, v_{34}), (v_{19}, v_{35}), q(v_{33}, v_{34}),$ $q(v_{33}, v_{47}), q(v_{34}, v_{48}), q(v_{35}, v_{49})$	$q(v_5, v_6), q(v_5, v_{18}), q(v_5, v_{34}), q(v_6, v_{33}),$ $q(v_{18}, v_{19}), q(v_{19}, v_{34}), q(v_{19}, v_{35}), q(v_{33}, v_{34}),$ $q(v_{33}, v_{47}), q(v_{35}, v_{49})$
5	$q(v_{14}, v_{15}), q(v_{15}, v_{16}), q(v_{15}, v_{21}), q(v_{16}, v_{18}),$ $q(v_{16}, v_{20}), q(v_{19}, v_{20}), q(v_{20}, v_{21}), q(v_{20}, v_{36}),$ $q(v_{21}, v_{22}), q(v_{21}, v_{37}), q(v_{35}, v_{36}), q(v_{35}, v_{49}),$ $q(v_{36}, v_{37}), q(v_{36}, v_{50}), q(v_{37}, v_{38})$	$q(v_{15}, v_{21}), q(v_{16}, v_{18}), q(v_{16}, v_{20}), q(v_{19}, v_{20}),$ $q(v_{20}, v_{36}), q(v_{21}, v_{22}), (v_{21}, v_{37}), q(v_{35}, v_{36}),$ $q(v_{35}, v_{49}), q(v_{36}, v_{37}), q(v_{36}, v_{50}), q(v_{37}, v_{38})$
6	$q(v_6, v_7), q(v_7, v_8), q(v_7, v_{32}), q(v_{29}, v_{31}),$ $q(v_{30}, v_{31}), q(v_{31}, v_{32}), q(v_{31}, v_{45}),$ $q(v_{32}, v_{33}), q(v_{32}, v_{46})$	$q(v_6, v_7), q(v_7, v_8), q(v_7, v_{32}), q(v_{29}, v_{31}),$ $q(v_{30}, v_{31}), q(v_{31}, v_{32}), q(v_{31}, v_{45}),$ $q(v_{32}, v_{33}), q(v_{32}, v_{46})$

附录 B. 第一阶段结果：权重情形 B-D 下固定充电站的空间分布。参见 图 B.1、图 B.2和图 B.3。

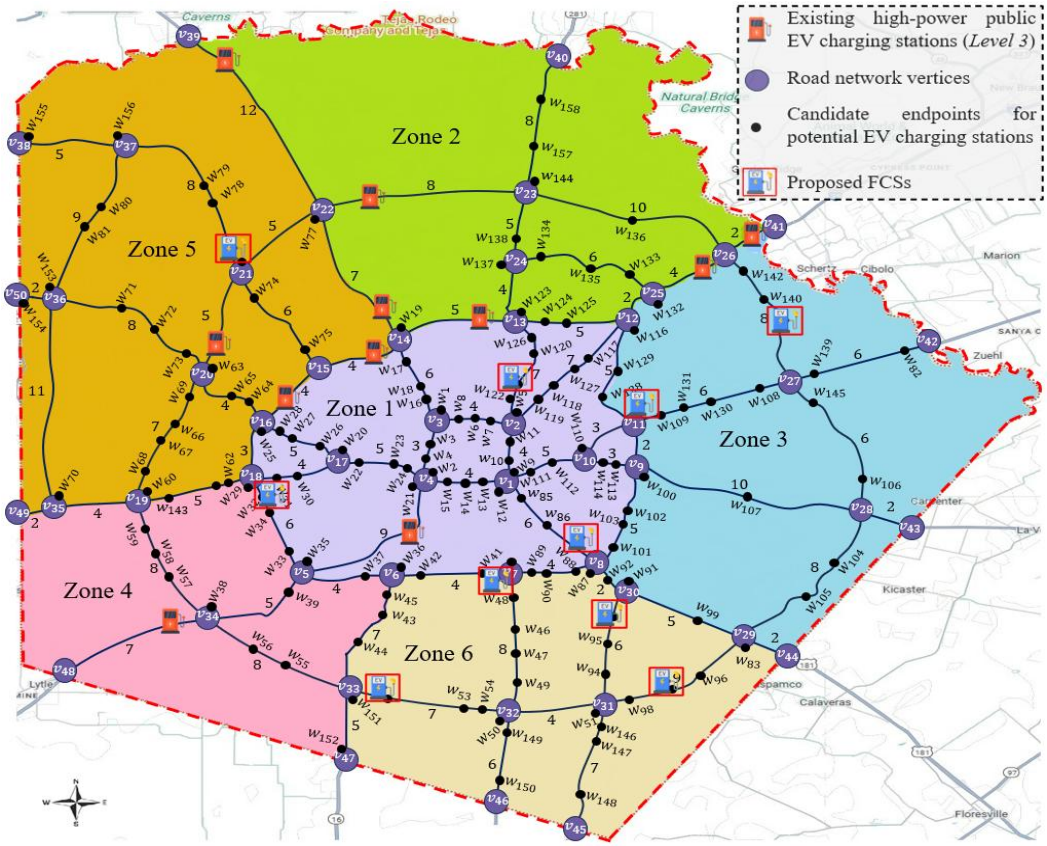

图 B.1：案例 B 下的 FCS 分配：城市出行优先

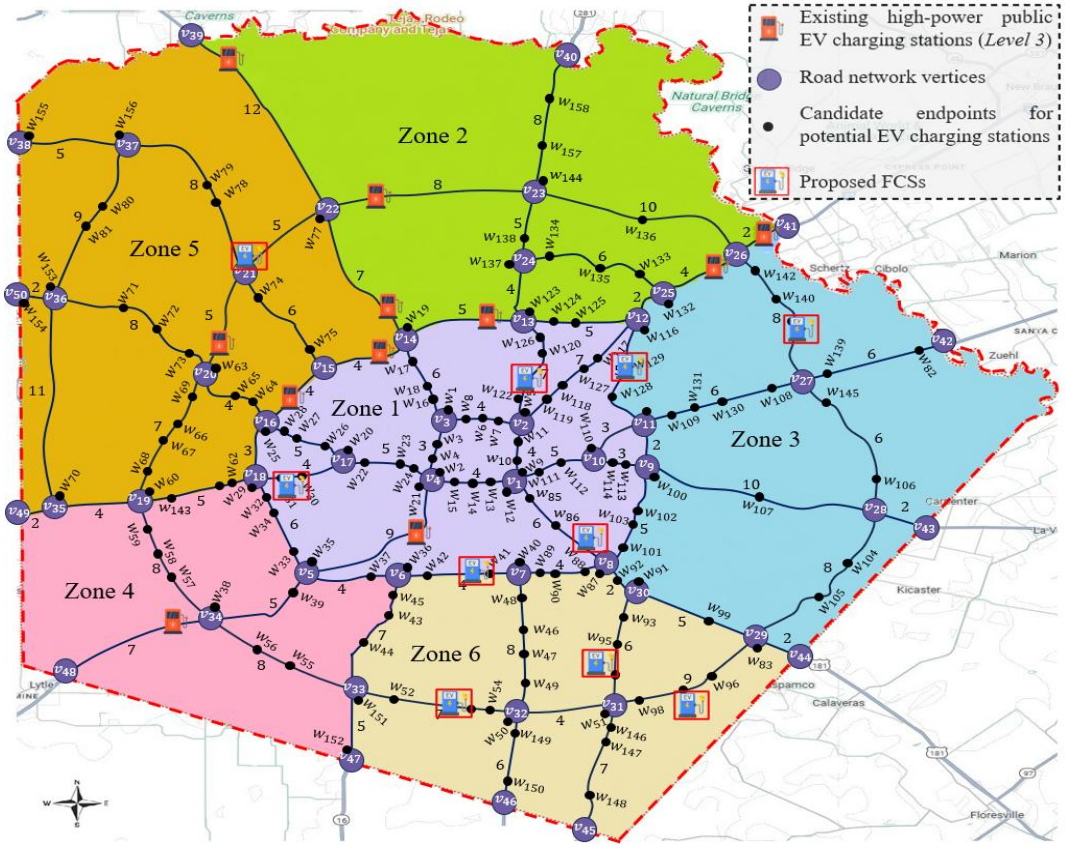

图 B.2：案例 C 下的固定充电站分配：出行正义导向

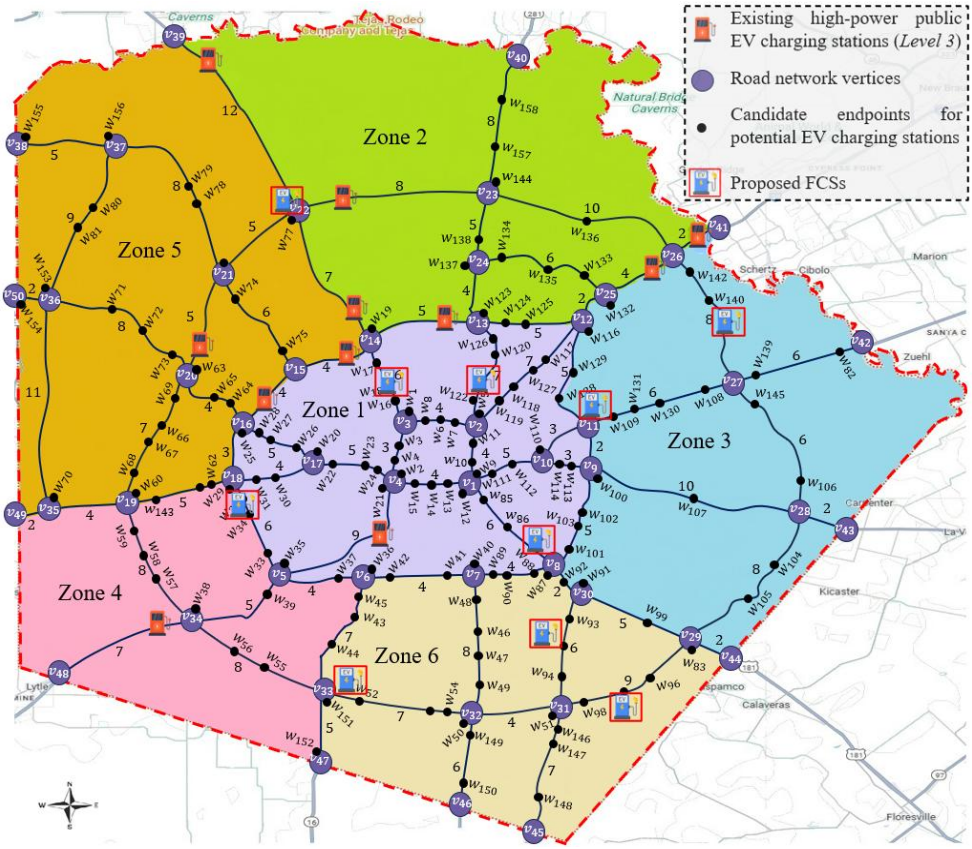

图 B.3：案例 D 情形下的 FCS 分配：电动汽车普及准备度

附录 C.

表 C.1：加权情形（B-D）下移动充电站的时空分配与运行计划

Case ID		时间段 1			时间段 2			时间段 3			时间段 4		
	Dinotat Selibo M	tnio pdn E dengiss A	eno Z detacoll A	edo M notarepO	tnio pdn E dengiss A	eno Z detacoll A	edo M notarepO	tnio pdn E dengiss A	eno Z detacoll A	edo M notarepO	tnio pdn E dengiss A	eno Z detacoll A	edo M notarepO
B	M_1	W_{104}	z3		97	z6	充电		发球	W_9		电	
	M_2	W_{149}	z6			z6	充电		发球	W_{52}		电	
	M_3	W_{121}	z1			z1	发球		1	充电	W_9		发球
	M_4	W_2	z1		2	Z1	充电		4	发球	W	充电	
	M_5	W_{84}	z1			z6	发球			充电	W_{87}		发球
	M_6	E_2	z1			z1	发球			充电	W_{35}		发球
	M_7	W_5	z1		1	z1	充电		发球	W_{121}			
	M_8	W_{52}	z6			z6	发球		充电	W_{149}			
	M_9	W_{97}	z6			z3	发球		充电	W_{105}			发球
	M_{10}	W_{141}	z3			z3	发球		充电	W_{106}			发球
C	M_1	W_{84}	z1			z6	发球		充电	W_{87}		球	
	M_2	W_{128}	z3			z3	发球		充电	W_{106}			发球
	M_3	W_{87}	z6		84	z1	充电		发球	W_{8}		电	
	M_4	W_{41}	z6			z4	发球		充电	W_{36}		球	
	M_5	W_{109}	z3		8	z3	充电		发球	W_{128}			
	M_6	W_{97}	z6			z6	发球		充电	W_{83}		球	
	M_7	W_{29}	z4		31	z1	充电		发球	W_3		电	
	M_8	W_{116}	z2		8	z3	充电		发球	W_{128}			
	M_9	W_{128}	z3			z2	发球		充电	W_{116}			发球
	M_{10}	W_{31}	z1			z4	发球		充电	W_{29}			发球
D	M_1	E_{10}	z2			z2	发球		充电	W_{133}	z		发球
	M_2	W_{141}	z3			z3	发球		充电	W_{106}			发球
	M_3	E_2	z1			z1	发球		充电	W_2			发球
	M_4	W_{97}	z6			z6	发球		充电	W_{83}		球	
	M_5	W_{20}	z1		32	z4	充电		发球	W_{3}		电	
	M_6	W_2	z1		2	z1	充电		发球	E_2		充电	
	M_7	W_{149}	z6			z6	充电		发球	W_{52}		电	
	M_8	W_{52}	z6			z4	发球		充电	W_{149}			发球
	M_9	W_{32}	z4			z4	发球		充电	W_{35}		球	
	M_{10}	W_{83}	z6			z6	充电	W_8	球			W_{97}	z6