

新能源汽车充电桩布局优化及其对城市交通流影响研究

柳仲

深圳市华安检验技术有限公司，广东省深圳市，518000；

摘要：围绕新能源汽车充电桩的空间配置与运行协同展开纯理论研究，提出把出行需求、能量补给与道路通行视为同一系统的整体建模思路。文章给出需求密度场与驻留时间场的抽象定义，构造设施分级与服务半径的可约束表示，并在安全、时效与公平三类目标下组织多层次优化。进一步讨论布局决策与交通流之间的双向耦合，构建由站点排队、车辆路径与信号控制共同组成的闭环机制，提出可解释的评估指标与迭代框架，给出从规划到运行的衔接路径与演化规则，为城市级决策提供通用的方法学支撑。

关键词：充电桩布局；交通流；多目标优化；公平性；协同调度

DOI：10.69979/3060-8767.25.05.063

引言

城市交通与能源补给正从分割式建设走向耦合式治理。充电桩作为能量接口在空间上具有黏性，在时间上呈现高峰集中，若仅以电力或土地视角配置，容易引发排队扩散与绕行叠加，从而改变原有路径选择与流量分配。要在系统层面获得稳定状态，需要将需求产生、设备服务、通行环境三类要素纳入统一建模，并以可验证指标指导迭代。本文在不依赖个案的前提下，提出概念框架与方法体系，围绕需求刻画、模型构建、算法求解与影响评估展开论证，明确数据接口与治理约束，强调模型可解释与可审计，形成从规划到建设再到运营的闭环路径，力求为城市级布局与日常调度提供抽象而可落地的技术要点。

1 概念界定与研究框架

1.1 需求空间分布与能量约束建模

需求空间可视为连续密度场，用以表达车辆在不同位置与时段的到达强度。为刻画充电行为的刚性约束，引入剩余能量状态与可达域概念，车辆在可达域内选择补给点以维持行程延续，密度场与能量状态共同决定潜在流向^[1]。驻留时间由设备功率、并行通道数、排队规则与价格感知共同影响，可抽象为服务时间分布的上下界，进而形成站点处的到达与服务耦合关系。土地使用结构与停车可达性决定有效吸纳能力，可通过可通行面积、出入口组织与步行友好度的函数近似表示，使需求侧与供给侧在统一坐标中对齐。在可达域的构造上，引入能量预算与备用边际的双重条件，既保证车辆能够抵达目标站点，也保留意外拥堵与设备占用带来的缓冲空间。需求强度与价格弹性存在交互，可用弹性矩阵描述

不同区域与时段的敏感度差异，以便在策略设计时区分刚性补能与可延后补能。对近程短途与远程长途可设置不同的风险厌恶参数，从而避免单一阈值导致的不合理集中。

为降低对细粒度轨迹的依赖并保护隐私，采用多尺度分解把城市同时划分为规则网格与功能区两套基底，网格承担高分辨率估计，功能区承担策略解释。道路等级、相位配时与行驶速度决定到站可达时间场，从而影响期望服务距离与等待容忍阈。模型不直接使用个体轨迹，而以匿名化的时空强度、停驻概率与能量余量分布作为输入，使推导具备可迁移性。通过引入结构化先验与连续性约束，密度场与时间场在数据稀缺区域仍能保持物理一致。在估计方法上，可采用核密度与图拉普拉斯正则的结合，让需求场既能表达聚簇结构，也能沿路网拓扑自然扩散。对异常峰值采用截断与重加权处理，防止短时活动对长期布局产生过强影响。模型输出为多层栅格与功能单元的联合图谱，支撑后续分层优化与滚动更新。

1.2 设施分级与服务半径刻画

设施分级用于表达不同服务能力与覆盖范围。可将路侧快充、社区慢充与枢纽重载视为三个层级，分别承担应急补能、日常补能与跨区转换。服务半径并非常数，而由到站成本、等待风险与价格感知共同决定，在不同密度、速度与管控条件下呈现弹性变化^[2]。为实现跨层协同，提出以对口与互补为约束的组合设计，确保任一位置在可接受时间内存在可行补给路径，同时避免同质设施无效聚集。对人口与车流高度集中区域，引入弹性容量概念，通过临时并行通道与移动补给单元扩展峰时承载，使固定设施不必为极端峰值过度建设。分级体系

还应内生考虑电网接入与配变能力的差异,把电力侧的灵活性资源与交通侧的时空调度连接起来。对于高速走廊与枢纽节点,可在结构设计中预留扩展接口,未来可接入更高功率或更先进的能量管理策略。

设施节点应携带可验证的能力向量,包含额定功率、可并行通道数、换位效率、调度接口与维护窗口,用于后续优化与运行时分配。站点周边的微循环组织会改变进入与离开路径的摩擦系数,可用折算因子修正名义距离,保证布局评估与实际通行一致。为提高长期可演化性,节点需具备模块化升级与在线接入能力,以便在不扰动周边交通的条件下完成扩容与设备替换。还应明确站内管控与路侧管控的分工边界,约束出口汇入的间隙接受规则与让行秩序,避免因局部设计不当引发连锁拥堵。节点之间应通过控制接口形成协同行为,包含负载共享、互为备份与分时让渡等机制。对路口邻近站点,需要把车道渠化与导向标识纳入一体化设计,确保转向与排队互不干扰。针对不同出行目的的车辆,可在内部设置差异化通道,使短停与长停分离,降低交叉冲突。能力向量与控制接口被纳入系统名录后,规划与运营就能在统一的数字底座上完成联合推演与快速调整。

2 布局优化模型与可解策略

2.1 多目标函数与约束体系

布局目标通常同时关切出行效率、用户成本与空间公平。可采用加权和与约束并行的混合形式,在平均行程时间、最大等待时间与跨区差异之间建立可调节的权衡。约束体系包含电网承载、用地强度、生态门槛与施工可行性等要素,同时加入网络连通与冗余要求,使系统在局部失效时仍具备替代路径^[3]。为保证算法可收敛,引入凸近似与分段线性化等技术,将功率与等待之间的非线性关系转化为可求解表达,并通过拉格朗日松弛把部分难约束转移到目标中,以便在大规模场景下保持求解速度。对公平目标可采用极大极小或分位改进准则,兼顾效率与弱势区的获得感。在公平约束的表达上,可引入空间覆盖阈与时间覆盖阈两组规则,要求弱势区在给定步行时间与行驶时间内均能获得基本服务。对环境目标可采用排放与噪声的综合指标,并以管控分区的方式约束建设密度与进出组织,避免突破生活圈的承载边界。

在联合建模时,站点排队与交通指派互为外生与内生。可采用分层方法把慢变量与快变量分开迭代,先在给定设施集与价格策略的条件下求解稳态流量与等待,再以评估结果更新权重、容量与位置,逐步逼近全局满

意解。为避免陷入局部不良状态,引入随机扰动、多起点并行与禁忌记忆机制,借助可行域投影保持约束不被破坏。针对边界地带的竞争效应,可以在目标中加入平滑项,抑制微小改动带来的剧烈流量迁移,并结合灵敏度分析识别高杠杆位置,把有限资源优先投向影响面广且稳定性高的候选点。当优化进入稳定阶段,需对结果进行可解释分析,识别每个约束对目标的边际贡献,并评估参数变动的敏感度范围。通过影子价格与拉格朗日乘子可以度量资源的稀缺程度,指导预算与土地指标的分配。为支持跨期决策,可把方案分解为可独立实施的阶段包,按照收益与扰动比排序,逐年推进并保持运行连续。

2.2 求解算法与近似最优性

城市级问题规模巨大,完全精确解往往不可及,需要兼顾质量与速度的近似策略。可采用列生成与剪枝相结合的框架,把候选位置与候选连接逐步扩展,同时删除贡献极小的元素,配合启发式搜索在局部细化。对排队耦合部分,使用近似的滞后函数刻画等待时间随负载的增长趋势,避免复杂随机过程推导,提升计算稳定性。针对不同层级设施,分别设置不同的采样密度与搜索半径,使计算资源集中在边际收益高的区域,并以分批锁定方式减少反复震荡^[4]。对于价格与引导策略的协同,可把行为响应作为低维代理模型嵌入求解过程,使用迭代校准匹配历史观测,使系统能够在策略空间内进行有效探索。

为强化解的鲁棒性,在训练阶段引入场景集,覆盖需求波动、道路扰动与设备故障等不利情形,通过极端情况的惩罚约束提升可用性。为平衡实时性与最优性,离线阶段生成多张策略图,在线按照观测状态在邻近图中插值,既保留结构化信息,又保证响应速度。对运营阶段的突发事件,预设安全触发阈并执行快速降级,把高功率需求引导到冗余走廊,把一般性需求推迟到低敏时段,同时以滚动窗口逐步恢复常态,使系统在扰动中保持有序。在多部门协同的场景下,建议采用分权协同的计算流程,交通、能源与城管各自维护子目标与子约束,通过交替方向的通信实现收敛。为保证公共性目标不被局部利益侵蚀,引入全局护栏与停机规则,在指标触碰底线时自动停止扩张并回滚到安全版本。

3 交通流影响机制与协同调度

3.1 充电行为对路径选择与流量演化的作用

充电行为改变路径选择,车辆在可达域边缘会偏向

含有可用站点的路径,这一偏好引起流量在含站走廊上的聚集,从而改变相邻路段的相位利用与排队形态。若站点容量不足,溢出队列将侵占车道,造成通行能力下降,诱发绕行与次生拥堵。相反,当站点组织合理且进出口与主流线保持顺畅衔接时,车辆可以在微循环内完成进出,交通扰动被限制在可控范围。对跨区出行,站点分布会改变长短路径的成本差异,进而影响干线与支路之间的分担关系。在瓶颈路段还可能出现回溯效应,拥堵波沿车道向上游传播,扩散到与站点无关的交叉口。若缺少冗余边界,微小的到达波动就会引发大幅波动,形成难以缓解的滞回环。相应对策是在站点外布置蓄滞区与隔离带,并把信号相位的绿信比与站内放行节拍进行对时,使流入流出保持平滑。

这一作用机理表明,布局优化不能只看点位,需要关注与信号控制、渠化方案、停车组织的协同。通过与绿波带宽、进口道车道数与转向比例的联合校核,可以在设计阶段排除易致拥堵的组合。对长时间停驻的慢充区域,建议与低敏感路段绑定,配合步行与非机动车通达,避免高峰时段的机动车交错。运行阶段可设置动态引导,把临界负载提前分流到备用站点与低敏路段,并以渐进方式调整价格与时段限制,使需求在时间与空间上得到平衡。配套的反馈控制以占用率与排队长度为核心信号,驱动引导与相位参数缓速变化,避免频繁切换造成驾驶负担。在多主体共存的走廊,需要明确公交与货运的优先级规则,确保骨干通道不被长期占用。区域联动时,边界交接节点应设置共享阈,以占用率与平均延误为触发条件启动跨区引导。对节假日与赛事活动等特殊时段,采用预演与预案双轨机制,提前注入预测队列并校核承载极限,给出逐级分流与备用站点的激活顺序。

3.2 评估指标与仿真框架

影响评估需要可解释的指标体系。效率维度关注出行时间、进入与离开时间以及等待时间,安全维度关注路段饱和度、冲突强度与溢出概率,公平维度关注区域差异与群体差异。仿真框架采用宏观与微观耦合方式,宏观侧用连续流量模型评估总体趋势,微观侧用基于主体的行为规则再现细节,两者通过边界条件交换保持一致。为提升可信度,引入回放机制将真实运行片段嵌入仿真,校核模型对突发扰动与恢复过程的再现能力,同时设置交叉验证以检验指标对参数变化的敏感度。指标

之间存在天然张力,需要在方法上提供可追溯的取舍路径。可构建多层仪表盘,基础层面对公众展示直观变化,高级层面对专业人员展示约束与边界的占用情况,便于在决策会上形成清晰共识。

为了支持持续迭代,需要把评估与运营数据闭环连接。运行阶段以探针车与路侧感知获取到达强度与等待分布,通过数据质检剔除异常值,再与仿真结果对比,若偏差持续超阈即触发重算与局部重布。治理层面设置公开绩效看板,透明展示服务可达性与时效改进,同时建立申诉与协商通道,听取不同区域与群体的体验反馈。通过制度化的目标管理与周期评审,配合预算与土地计划的滚动更新,促使布局与运营在长期中保持向优演化。当系统跨越多个行政单元时,应设置统一的数据字典与接口规范,保障采集、计算与展示的一致。对外沟通采用分层披露策略,既满足透明要求,也保护关键设施与个人隐私。通过对方案与成效的周期复盘,沉淀可移植的规则集与参数范围,为后续城区与新城复制提供明确参照。

4 结语

面向城市级充电桩布局与交通流关系,关键在于把需求、设施与通行视为同一系统中的相互作用者。通过密度场与可达域刻画需求,通过分级与服务半径表达设施,通过联合优化与分层协同连接运行与建设,可以把局部改进汇聚为全局绩效提升。未来演进应在安全底线与公平目标上保持稳定约束,在算法、数据与制度之间建立可复核接口,形成透明而可解释的决策链条,使能源补给与交通运行在长期中达到可预期的均衡,并在技术进步与治理学习中持续优化。

参考文献

- [1]周博雅. 充电基础设施投资对城市交通韧性影响的动态仿真研究[D]. 中央财经大学,2023. DOI: 10. 27665/d.cnki. gzcju. 2023. 002191.
- [2]王永兴. 电动汽车充电服务诱导策略及优化问题研究[D]. 北京交通大学,2020. DOI: 10. 26944/d.cnki. gb fju. 2020. 000034.
- [3]章乐,王晶晶. 充电桩产业发展的模式探索——以城市交通企业发展充电桩产业为例[J]. 城市公共交通,2020, (01): 42-46.
- [4]李正恩. 基于交通行为的城市电动汽车充电网络规划与运营研究[D]. 山东大学,2014.