港口集疏运电动重卡多模式补能网络协同规划方法

缪鸿志[1]，吴佳雨[1]，李歆蔚[2]，郑建风[1†]

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院，辽宁 大连 116026；2. 大连海事大学 法学院，辽宁 大连 116026)

摘　要: 补能基础设施不足是制约港口集疏运电动重卡规模化应用的关键瓶颈, 而单一补能模式难以兼顾经济性与时效性. 针对该问题, 本文建立充换电设施协同部署的混合整数规划模型, 对载重差异能耗、基于马尔可夫链的补能需求空间分布以及差异化排队动态三类关键特征进行内生化建模. 模型采用综合模态排放模型刻画重载与空载工况的能耗差异, 分别构建 M/M/C/K 系统与车辆-电池混合排队网络表征充电站与换电站的服务时延, 并引入 Wardrop 用户均衡约束描述驾驶员的补能选择行为. 针对模型的非凸性与组合复杂性, 设计基于拉格朗日对偶分解的求解算法, 通过对偶松弛将原问题分解为可独立求解的节点子问题, 并采用次梯度迭代实现全局协调. 基于大连港实际数据的数值实验表明: 协同规划策略的系统总收益较纯充电模式提升 18.46%, 全网平均补能时间降低 32.54%. 最优布局呈现显著的功能差异化特征, 换电站集中部署于港区核心节点以保障高峰时段运营效率, 充电站则在近港区网络化布局以控制建设成本.

关键词: 智能交通；电动重卡；充换电设施选址；港口集疏运；排队网络；混合整数规划

中图分类号: U495　　**文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2026.0556

引用格式: 缪鸿志, 吴佳雨, 李歆蔚, 等. 港口集疏运电动重卡多模式补能网络协同规划方法 [J]. 控制与决策.

Collaborative planning of multi-mode recharging infrastructure for electric heavy-duty trucks in port collection and distribution systems

MIAO Hongzhi[1]，*WU Jiayu*[1]，*LI Xinwei*[2]，*ZHENG Jianfeng*[1†]

(1. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China；2. College of Law，Dalian Maritime University，Dalian 116026，Liaoning，China)

Abstract: The insufficiency of recharging infrastructure remains a critical bottleneck constraining the large-scale deployment of electric heavy-duty trucks in port drayage operations, while a single recharging mode fails to balance economic efficiency and time effectiveness. This paper develops a mixed-integer programming model for the collaborative deployment of charging and battery swapping stations, which endogenously captures payload-dependent energy consumption, Markov chain-based spatial distribution of recharging demand, and differentiated queueing dynamics. The model employs the Comprehensive Modal Emissions Model for laden/unladen energy consumption, an M/M/C/K system and a coupled vehicle-battery hybrid queueing network for service delays at charging and swapping stations respectively, and Wardrop user equilibrium constraints for drivers' recharging choices. A Lagrangian decomposition-based algorithm handles the non-convexity and combinatorial complexity through dual relaxation and subgradient iteration. Numerical experiments based on Dalian Port data demonstrate that the collaborative strategy improves total system profit by 18.46% over the charging-only mode and reduces network-wide average recharging time by 32.54%. The optimal layout concentrates swapping stations at core port nodes for peak-period efficiency while deploying charging stations across near-port areas for cost control.

Keywords: intelligent transportation； electric heavy-duty trucks； charging and swapping facility siting； port collection and distribution；queueing networks；mixed-integer programming

0　引　言

重型货车虽仅占道路车辆总量的 3%, 却贡献了约 25% 的温室气体排放, 其电动化转型对于降低交通领域碳排放具有重要战略意义[1]. 港口集疏运系统

收稿日期: 2026-06-09；**录用日期:** 2026-09-18.
基金项目: 辽宁省社会科学规划基金项目 (L21CSH002).
责任编委: 龙建成.
†通信作者. E-mail: jfzheng@dlmu.edu.cn.

因路线固定、行驶里程可预测、车辆在港区停留时间充裕等特点, 被普遍认为是电动重卡规模化应用的理想初始场景, 目前全球主要港口已通过多项试点验证了其技术可行性与应用潜力[2]. 然而, 补能基础设施不足始终是制约电动集卡规模化应用的关键瓶颈[3].

港口集疏运呈现高频短倒作业与低频长运任务并存的运营模式, 载重状态对能耗的显著影响导致车辆续航里程与补能频率具有高度异质性[2]. 同时, 港区作业的“潮汐性”特征使补能需求在时空分布上极不均衡, 而商用卡车对时间成本高度敏感. 上述特性决定了单一补能模式难以兼顾经济性与时效性. 传统充电站建设成本较低, 但单次补能需 0.5 至 1 小时, 高峰期易引发长时间排队, 导致车队周转率下降. 换电站可在数分钟内完成补能, 但建设成本高达充电站的 3 至 5 倍, 且受限于备用电池储备与标准化要求, 难以实现全网络覆盖. 鉴于此, 充换电协同部署成为极具潜力的解决方案, 其核心思路是利用充电站的低成本优势构建基础覆盖网络, 同时发挥换电站的高吞吐能力作为关键节点的战略补充, 在有限预算约束下实现系统效益最优[4].

国内外学者围绕电动重卡的运营优化与补能设施规划开展了大量研究. 在运营层面, 已有研究通过 GPS 轨迹数据构建了港口集疏运专用驾驶周期[5], 分析了载重特性对电动化替代的适用性[6], 并探讨了充电资源约束下的集卡调度[3] 与路径充电联合优化[7] 等问题. 在补能设施选址方面, 早期研究聚焦于单一充电模式, 围绕续航约束下的用户均衡路径选择[8]、充电站位置与规模联合优化[9]、异质续航焦虑[10] 以及轨迹数据驱动的多目标选址[11] 等问题提出了多种规划模型. 换电设施方面, Wang 等针对城市电动出租车换电系统的研究表明, 优化规划可使平均时间成本显著降低[12].

近年来, 随着换电技术的成熟, 充换电协同规划逐渐成为研究热点. 余冰等[13] 和王瀚青等[14] 分别提出了充换放储一体站和充换电站联合布局的规划模型, Lai 等证实了充换电混合网络在降低时间成本与提升车队利用率方面的显著优势[4]. 在排队建模方面, Tan 构建了耦合车辆与电池队列的混合排队网络[15], Zhang[16] 和 Diao 等[17] 分别采用优先队列模型和双策略服务网络刻画不同补能模式的服务差异. 此外, 部分研究还关注了规模化电动重卡充换电对区域电网的影响及协同调度[18,19], 以及车站网一体化协同规划[20].

尽管上述研究取得了重要进展, 但在港口集疏运电动重卡补能网络规划方面仍存在明显不足. 其一, 现有补能设施规划以乘用车或城市公交为主要对象, 其需求分布、能耗特征和服务要求与港口集疏运存在本质差异. 针对重型车辆的研究虽考虑了重载特征, 但主要面向长途货运场景, 缺乏对港口高频短倒作业模式及其补能排队约束的深入刻画. 其二, 现有港口电动集卡研究多局限于单一充电模式, 未能充分挖掘充换电技术组合在应对高强度作业方面的效率优势, 也缺乏对不同补能模式与差异化运输任务之间匹配规律的系统探讨.

针对上述问题, 本文建立港口集疏运场景下充换电设施协同部署的混合整数规划模型, 将载重差异能耗、补能需求空间分布与设施排队动态三类关键特征进行内生化建模. 在此基础上, 设计基于拉格朗日分解的求解算法, 通过对偶松弛与次梯度迭代处理模型的非凸性与组合复杂性. 最后, 基于大连港实际数据开展实证分析, 揭示协同规划策略的经济优势与空间布局规律, 为港口电动化转型中的基础设施规划提供理论工具与决策参考.

1 数学模型

1.1 问题描述与建模框架

本文研究港口集疏运场景下电动集卡车队的充换电设施协同规划问题. 考虑一个由港区、近港区、内陆集散节点、铁路枢纽节点和远程腹地节点构成的多层次集疏运网络, 运营商需在预算约束下确定充电站与换电站的选址及规模, 以最大化系统运营效益. 设$\mathcal{I}$表示网络节点集合, 索引为$i \in \mathcal{I}$; $\mathcal{J} \subseteq \mathcal{I}$表示可作为运输目的地的节点子集, 索引为$j \in \mathcal{J}$. 节点间的连接关系由距离矩阵$[d_{ij}]$和行驶时间矩阵$[t_{ij}]$刻画. 定义补能模式集合$\mathcal{K} = \{c, s\}$, 其中$c$表示充电, s表示换电.

如图 1 所示, 模型框架分为系统建模与网络规划两个层次. 系统建模层包含能耗模型、补能需求生成模型和排队时间模型, 分别量化载重差异能耗、需求空间分布与设施服务时延. 网络规划层以系统效益最大化为目标, 协调设施选址配置 (战略层) 与车流补能分配 (运营层) 两组决策, 并通过车队规模守恒与能量平衡约束将子模型输出嵌入优化求解. 模型以典型运营日的稳态车流分布作为规划依据. 模型基于以下假设:

A1. 假定同类补能设施采用标准化统一配置, 如固定的桩数或工位数.

A2. 鉴于港口重卡高度依赖专用集疏运通道或固定干线, 路径选择自由度低, 假定各 OD 对的运输

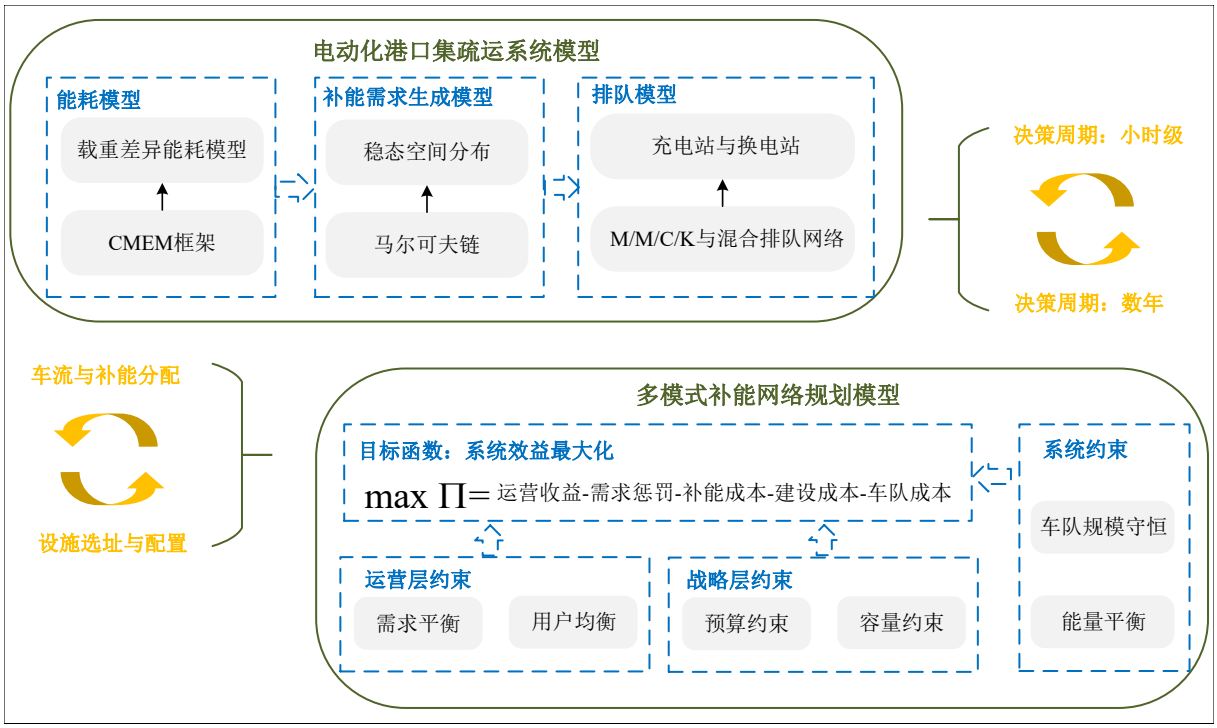

图 1　模型框架

路径固定且唯一.

A3. 假定单次任务总能耗与距离呈线性关系, 通过综合模态排放模型 (CMEM) 将载重、车速等非线性因素内嵌于单位距离能耗系数中.

A4. 假定各类未满足需求的单位惩罚成本均等.

1.2　基础设施部署约束

运营商可在网络节点部署充电站与换电站两类补能设施, 同一节点允许同时部署两类设施. 决策变量$x_i^k \in \mathrm{Z}_+$表示在节点i建设的模式k设施数量, 需满足总预算约束:

$$\sum_{i\in\mathcal{I}}\sum_{k\in\mathcal{K}}\gamma^k x_i^k \leqslant b. \tag{1}$$

其中γ^k为单个模式k设施的建设成本年化值, b为总预算.

此外, 为避免单一节点因设施过度集中引发配电网过载或超出土地限制, 引入节点部署上限约束:

$$x_i^k \leqslant x_i^{k,max},\ \forall i \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}. \tag{2}$$

式中$x_i^{k,max}$为节点i允许部署模式k设施的最大数量.

1.3　运输需求与车流分配

港口集疏运作业具有明确的流向和载重特征. 根据集装箱状态和流向定义运输模式集合$\mathcal{M} = \{\mathrm{DF}, \mathrm{PE}, \mathrm{DE}, \mathrm{PF}\}$, 分别代表交付重箱 (DF, 港口至内陆)、提取空箱 (PE, 内陆至港口)、交付空箱 (DE, 港口至内陆) 和提取重箱 (PF, 内陆至港口). 其中 DF 与 PF 对应重载工况, PE 与 DE 对应轻载工况.

设D_{ij}^m为 OD 对(i,j)在运输模式m下的需求, q_{ij}^m为实际服务的车辆流量, $s_{ij}^m \geqslant 0$为未满足的需求, 三者满足平衡关系:

$$q_{ij}^m + s_{ij}^m = D_{ij}^m,\ \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, m \in \mathcal{M}, \tag{3}$$

$$0 \leqslant q_{ij}^m \leqslant D_{ij}^m, s_{ij}^m \geqslant 0,\ \forall i, j, m. \tag{4}$$

未满足需求需承担惩罚成本$\gamma_p s_{ij}^m$, 其中γ_p为单位惩罚成本. 该设定允许运营商在资源有限时选择性放弃低利润线路, 反映实际运营中的经济权衡.

1.4　载重差异能耗模型

电动集卡能耗显著依赖于载重状态, 重箱与空箱运输的能耗差异可达 70% 以上. 本文基于 CMEM 框架建立适用于电动集卡运行特征的能耗模型. 运输任务(i,j,m)的总能耗为:

$$E_{ij}^m = e_{ij}^m \cdot d_{ij}. \tag{5}$$

其中, d_{ij}为行驶距离, 单位里程能耗率e_{ij}^m由三部分组成:

$$e_{ij}^m = \frac{\phi_e}{v_{ij}} + \phi_s v_{ij}^2 + \phi_w(Q_T + Q^m). \tag{6}$$

第一项ϕ_e / v_{ij}代表辅助系统基础能耗, 与速度成反比, 低速行驶时该项占比显著上升. 第二项$\phi_s v_{ij}^2$为空气阻力能耗, 与车速的平方成正比, 反映高速行驶时的额外能量需求. 第三项$\phi_w(Q_T + Q^m)$表示滚动阻力与爬坡能耗, 与总载重线性相关. 式中, v_{ij}为平均行驶速度, ϕ_e为辅助系统功率系数, ϕ_s为空气阻力系数, ϕ_w为滚动阻力与路面坡度综合系数, Q_T为车辆自重, Q^m为运输模式m下的货物载重.

1.5 补能需求生成与空间分布

本节建立补能需求的宏观分布模型, 包括需求总量的内生确定及其在设施间的空间分配.

a) 潜在补能需求的空间分布 每次补能将电池从触发阈值ε充至满电, 设电池容量为Ω, 单次有效补能电量为$\Omega(1-\varepsilon)$. 由能量守恒, 全网单位时间的总补能次数为:

$$\Lambda_{\text{total}}=\frac{\sum_{i\in\mathcal{I}}\sum_{j\in\mathcal{J}}\sum_{m\in\mathcal{M}}E_{ij}^{m}\cdot q_{ij}^{m}}{\Omega(1-\varepsilon)}. \tag{7a}$$

分子为全部运输任务的总能耗. 车辆车辆空驶至补能站的能耗纳入完整能量平衡约束, 详见 1.7 节公式 (22). 总补能需求Λ_{total}按车辆稳态停留概率n_i在空间上分配, 节点i的潜在补能需求为:

$$\Lambda_i=n_i\cdot\Lambda_{\text{total}},\sum_{i\in\mathcal{I}}n_i=1. \tag{7b}$$

稳态概率基于马尔可夫链求解. 设t_{ij}为节点间行驶时间, 由 Little 定律计算平均在途车辆数:

$$R_{ij}=\sum_{m\in\mathcal{M}}q_{ij}^{m}t_{ij}. \tag{8}$$

据此定义状态转移概率矩阵$\mathbf{P}=[P_{ij}]$:

$$P_{ij}=\frac{R_{ij}}{\sum_{j'\in\mathcal{J}}R_{ij'}},\ \sum_{j\in\mathcal{J}}P_{ij}=1,\ \forall i\in\mathcal{I}. \tag{9}$$

稳态分布向量$\mathbf{n}=[n_i]^T$满足马尔可夫链的稳态方程:

$$\mathbf{n}^T\mathbf{P}=\mathbf{n}^T,\ \sum_{i\in\mathcal{I}}n_i=1. \tag{10}$$

当车流图强连通且$q_{ij}^{m}>0$时, 根据 Perron-Frobenius 定理可知上述方程存在唯一正解.

b) 补能需求的用户均衡分配 节点i的补能需求Λ_i需在网络设施间分配. 设f_{ij}^{k}为从节点i前往节点j选择模式k补能的车辆流量, 满足守恒条件:

$$\sum_{j\in\mathcal{J}}\sum_{k\in\mathcal{K}}f_{ij}^{k}=\Lambda_i,f_{ij}^{k}\geqslant 0,\ \forall i\in\mathcal{I}. \tag{11}$$

节点j的模式k设施总到达率λ_j^k为:

$$\lambda_j^k=\sum_{i\in\mathcal{I}}f_{ij}^{k},f_{ij}^{k}\geqslant 0,\ \forall j\in\mathcal{J},k\in\mathcal{K}. \tag{12}$$

驾驶员选择补能地点和模式以最小化个人广义成本c_{ij}^{k}, 包含行驶时间t_{ij}、排队等待时间w_j^k和服务时间t^k三部分

$$c_{ij}^{k}=t_{ij}+w_j^k+t^k,\ \forall i,j,k. \tag{13}$$

其中充电时间$t^{k=s}$大于换电时间$t^{k=c}$. 根据 Wardrop 均衡原则, 均衡状态下所有被使用路径的成本相等且不高于未使用路径的成本[21]. 数学表述为互补松弛条件, u_i即节点i的均衡补能成本:

$$\begin{aligned}&f_{ij}^{k}\geqslant 0,c_{ij}^{k}-u_i\geqslant 0,\\&f_{ij}^{k}(c_{ij}^{k}-u_i)=0,\forall i,j,k\end{aligned} \tag{14}$$

该均衡刻画了在给定设施布局下驾驶员的理性选择行为. 当某设施拥堵加剧时, 部分需求将自发转移至其他设施, 直至系统达到新的均衡状态.

1.6 排队时间模型

补能等待时间$w_j^k(\lambda_j^k,x_j^k)$高度依赖于到达率λ_j^k与设施部署数量x_j^k, 直接影响车队利用率与运营成本. 本节分别对两类设施建立排队模型.

a) 充电站排队模型 假设车辆到达服从到达率为λ_j^c的泊松过程, 充电时间服从均值为t^c的指数分布, 每站有C个充电桩和K个等候位, 建模为 M/M/C/K 排队系统. 定义利用率$\rho_j^c=\lambda_j^c t^c/C$, 当$\rho_j^c<1$时系统稳定. 设$P_n^c$为系统中处于服务状态及排队状态的$n$辆车的稳态概率, 其分布为:

$$P_n^c=\begin{cases}\dfrac{(\lambda_j^c t^c)^n}{n!}P_0^c,n\leqslant C\\[2ex]\dfrac{(\lambda_j^c t^c)^n}{C!\cdot C^{n-C}}P_0^c,C<n\leqslant K+C\end{cases} \tag{15}$$

其中归一化常数P_0^c可通过标准公式计算.

期望队列长度$L_q^c=\sum_{n=C+1}^{C+K}(n-C)P_n^c$, 由 Little 定律, 平均等待时间为:

$$w_j^c=\frac{L_q^c}{\lambda_j^c(1-P_{C+K}^c)}. \tag{16}$$

其中P_{C+K}^c为阻塞概率, 表示队列已满时车辆无法进入的概率.

b) 换电站排队模型 换电站的服务能力不仅取决于换电工位数量, 还受满电电池库存约束. 当满电电池耗尽后, 即使工位空闲, 车辆也无法完成换电, 系统进入服务中断状态. 设每座换电站配置S个换电工位、$\tilde{B}$块备用电池和$\tilde{C}$个电池充电桩. 节点i部署x_i^s座换电站后, 总换电工位数为Sx_i^s, 总电池数为$\tilde{B}x_i^s$, 总电池充电桩数为Cx_i^s.

采用二元组(n,b)描述系统状态, 其中n为站内车辆数, b为可用满电电池数. 状态空间$\delta=\{(n,b):0\leqslant n\leqslant K^s x_i^s,0\leqslant b\leqslant\tilde{B}x_i^s\}$, $K^s x_i^s$为系统最大车辆容量. 系统状态由以下三类事件驱动: **事件一 (车辆到达)**, 若站内车辆数未达容量上限则进入系统, 否则被拒绝:

$$(n,b)\xrightarrow{\lambda_i^s}(n+1,b),n<K^s x_i^s. \tag{17a}$$

事件二 (换电完成), 车辆离开并消耗一块满电电池. 实际换电速率取站内车辆数n、可用电池数b

和工位数Sx_i^s的最小值与单工位换电速率$\mu^s = 1/t^s$之积:

$$(n,b) \xrightarrow{\min\{\mathrm{n},b,Sx_i^s\}\cdot\mu^s} (n-1,b-1),\quad n \geqslant 1, b \geqslant 1. \tag{17b}$$

当满电电池为零即$b=0$时换电速率降为零, 此时服务中断. **事件三 (电池充满)**, 充电桩上的亏电电池完成充电后转为满电状态, 正在充电的电池数为$\min\{\tilde{B}x_i^s - b, \tilde{C}x_i^s\}$, 单块电池充电速率为$\mu^s = 1/t^b$:

$$(n,b) \xrightarrow{\min\{\tilde{B}x_i^s - b, \tilde{C}x_i^s\}\cdot\mu^b} (n,b+1),\quad b < \tilde{B}x_i^s. \tag{18a}$$

上述三类事件的转移率构成二维连续时间马尔可夫链[22]. 设$G(n,b)$为状态(n,b)的稳态概率, 对任意$(n,b)\in\delta$, 平衡方程为:

$$\begin{aligned}[\lambda_i^s \cdot \mathbf{1}_{n<K^s x_i^s} + \min\{\mathrm{n}, b, Sx_i^s\}\cdot\mu^s + \\ \min\{\tilde{B}x_i^s - b, \tilde{C}x_i^s\}\cdot\mu^b]G(n,b) = \\ \lambda_i^s \cdot G^{\omega}(n-1,b)\cdot\mathbf{1}_{n\geqslant 1} + \\ \min\{n+1, b+1, Sx_i^s\}\cdot\mu^s\cdot \\ G(n+1,b+1)\cdot 1_{n<K^s x_i^s, b<\tilde{B}x_i^s} + \\ \min\{\tilde{B}x_i^s - b + 1, \tilde{C}x_i^s\}\cdot\mu^b\cdot \\ G(n,b-\mathbf{1})\cdot\mathbf{1}_{b\geqslant 1}.\end{aligned} \tag{18b}$$

等号左侧为状态(n,b)的总流出率, 右侧三项分别为车辆到达、换电完成和电池充满引起的流入率. 配合归一化条件$\sum_{n=0}^{K^S x_i^S}\sum_{b=0}^{\tilde{B}x_i^S} G(n,b) = 1$, 通过数值迭代求解稳态分布. 由此可导出三个服务指标. 期望队列长度:

$$L_q^s = \sum_{n=0}^{K^s x_i^s}\sum_{b=0}^{Bx_i^s} \max\{0, n - Sx_i^s\}\cdot G(n,b). \tag{19a}$$

系统阻塞概率:

$$P_B^s = \sum_{b=0}^{Bx_i^s} G(K^s x_i^s, b) \tag{19b}$$

服务中断概率 (换电站特有, 度量满电电池库存为零的时间比例):

$$P_{\text{int}}^s = \sum_{n=0}^{K^s x_i^s} G(n,0) \tag{19c}$$

由 Little 定律可得平均等候时间w_i^s:

$$w_i^s = \frac{L_q^s}{\lambda_i^s(1-P_B^s)} \tag{20}$$

w_i^s仅为排队等候时间, 不包含换电操作本身所需的时间t^s.

1.7　系统约束

a) 车队规模守恒 系统总车队规模N等于运输中、前往补能和补能中三类车辆的平均数量之和:

$$N = \sum_{i,j,m} q_{ij}^m t_{ij} + \sum_{i,j,k} f_{ij}^k t_{ij} + \sum_{i,k}\lambda_i^k(w_i^k + t^k). \tag{21}$$

由此可见, 设施拥堵加剧将导致等待时间w_i^k上升, 进而增加所需车队规模N, 推高车队运营成本. 约束 (21) 通过引入受设施规模影响的等待时间w_i^k, 将基础设施服务能力与运营调度决策q_{ij}^m和f_{ij}^k耦合, 体现基础设施规划对运营效率的影响.

b) 能量平衡 系统总能耗 (运输任务能耗与前往补能的空驶能耗之和) 等于总补能量:

$$\sum_{i,j,m} E_{ij}^m q_{ij}^m + \sum_{i,j,k}\omega_0 d_{ij} f_{ij}^k = \sum_i \Lambda_i \Omega(1-\varepsilon). \tag{22}$$

其中ω_0为空驶状态下的平均单位能耗.

c) 设施容量耦合约束 仅在节点部署了相应设施时才允许分配非零补能需求:

$$\lambda_j^k \leqslant \rho_{max}^k x_j^k,\ \forall j\in\mathcal{J}, k\in\mathcal{K}. \tag{23}$$

式中, ρ_{max}^k为单个模式k设施的最大服务率.

1.8　目标函数

决策目标为最大化系统总利润. 定义完成运输任务(i,j,m)的单位收益p_{ij}^m, 单位时间价值系数γ_h, 车辆运营成本系数γ_e, 目标函数为:

$$\begin{aligned}\max\Pi = \sum_{i,j,m} p_{ij}^m q_{ij}^m - \sum_{i,j,m}\gamma_p s_{ij}^m - \\ \sum_i \gamma_h u_i \Lambda_i - \sum_{i,k}\gamma^k x_i^k - \gamma_e N.\end{aligned} \tag{24}$$

式中运输收益$p_{ij}^m q_{ij}^m$反映市场价格和运距, 需求惩罚$\gamma_p s_{ij}^m$刻画市场份额损失, 补能成本$\gamma_h u_i \Lambda_i$考虑驾驶员时间价值, 建设成本$\gamma^k x_i^k$为设施投资的年化值, 车队成本$\gamma_e N$包含车辆购置与维护的年化费用. 综合以上各节, 完整的优化模型为:

$$(\mathrm{P0})\ \max_{\mathbf{q,s,f,x}}\Pi$$

s.t. (1)-(3), (5)-(20), (21)-(23)

$$x_i^k \in \mathbb{Z}_+, q_{ij}^m, s_{ij}^m, f_{ij}^k \geqslant 0$$

该问题包含 MPEC 互补约束、排队模型隐函数非线性和整数变量组合复杂性, 属于混合整数非线性规划问题[23].

2　基于拉格朗日对偶分解的求解算法

问题 (P0) 包含互补约束 (14) 导致的非凸可行域、排队时间隐函数非线性以及整数变量的组合复杂性, 难以直接应用商业求解器求解. 本文提出基于拉格朗日对偶分解的求解算法, 分三步将原问题转化为可高效求解的形式. 第一步, 松弛用户均衡约束, 将补能流量决策简化为到达率分配. 第二步, 对预算

约束与能量平衡约束进行对偶松弛, 将问题分解为独立的节点子问题. 第三步, 通过次梯度迭代更新对偶乘子, 协调各子问题逐步收敛至全局可行解. 算法流程如图 2 所示.

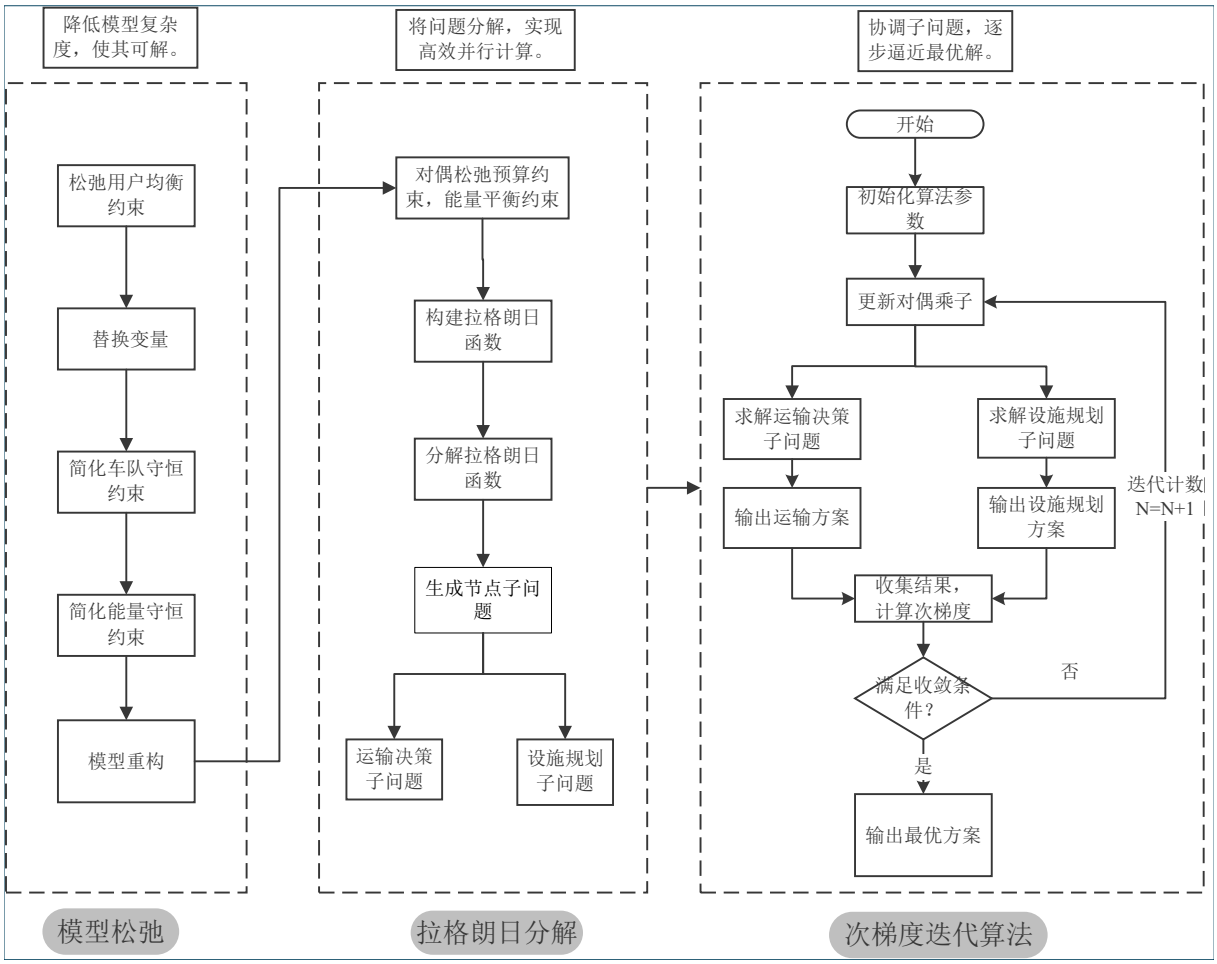

图 2 拉格朗日对偶分解算法框架

2.1 模型松弛

原问题中互补约束 (14) 的可行域在任何可行点处均违反标准约束规范条件, 需进行两步重构: **第一步, 简化决策变量**. 排队时间模型 (1.6 节) 仅依赖各节点的聚合到达率$\lambda_j^k=\sum_i f_{ij}^k$而非起讫对级的补能流$f_{ij}^k$, 因此直接以节点到达率$\lambda_i^k$作为决策变量. 补能广义成本相应简化为:

$$\bar{c}_i^k=\bar{t}_i+w_i^k(\lambda_i^k,x_i^k)+t^k. \tag{25}$$

式中, $\bar{t}_i$为节点的平均行驶时间.

第二步, 松弛互补约束. 引入辅助参数$\xi>0$对原均衡条件进行松弛:

$$\bar{c}_i^k-\bar{u}_i\geqslant 0,\lambda_i^k\geqslant 0, \tag{26}$$

$$\lambda_i^k(\bar{c}_i^k-\bar{u}_i)\leqslant\xi. \tag{27}$$

式中, $\bar{u}_i$为节点i的均衡成本. 当$\xi\to 0$时, 式 (27) 渐近恢复原始互补松弛条件$\lambda_i^k(\bar{c}_i^k-\bar{u}_i)=0$, 松弛解随$\xi$减小而逐步逼近原始均衡. 车队守恒约束和能量平衡约束相应简化为:

$$N=\sum_{i,j,m}q_{ij}^m t_{ij}+\sum_{i,k}\lambda_i^k(w_i^k+t^k), \tag{28}$$

$$\sum_{i,j,m}E_{ij}^m q_{ij}^m+\sum_{i,k}\lambda_i^k\omega_0\bar{d}_i=\sum_{i,k}\lambda_i^k\Omega(1-\varepsilon). \tag{29}$$

其中$\bar{d}_i$为节点i的平均补能行驶距离. 此外, 引入容量约束$\lambda_i^k\leqslant\rho_{max}^k x_i^k$, 其中$\rho_{max}^k$为单个模式$k$设施的最大服务率. 综合上述松弛, 得到简化模型:

$$\begin{aligned}(\mathrm{P1})\ \max_{\mathbf{q},\mathbf{s},\lambda,\mathbf{x}}\ &\sum_{i,j,m}p_{ij}^m q_{ij}^m-\sum_{i,j,m}\gamma_p s_{ij}^m-\sum_{i,k}\gamma_h\lambda_i^k\bar{c}_i^k-\\&\sum_{i,k}\gamma^k x_i^k-\gamma_e N\end{aligned}$$

s.t. (1)-(3), (22)-(23)

$$\lambda_i^k\leqslant\rho_{max}^k x_i^k, x_i^k\in\mathbb{Z}_+, q_{ij}^m, s_{ij}^m, f_{ij}^k\geqslant 0$$

2.2 拉格朗日分解

问题 (P1) 中预算约束 (1) 和能量平衡约束 (22) 耦合了全部节点的决策变量. 设$\theta\geqslant 0$为能量平衡约束的乘子, $\eta\geqslant 0$为预算约束的乘子, 构建拉格朗日函数$\mathcal{L}$并重组各项, 可分解为节点独立贡献之和:

$$\mathcal{L} = \sum_{i\in\mathcal{I}} \mathcal{L}_i + \eta b. \tag{30}$$

其中$\mathcal{L}_i$为节点i的局部拉格朗日函数. 据此, 原问题分解为两类节点子问题.

a) 运输决策子问题 SP1-i 对每个节点$i\in\mathcal{I}$求解运输流量分配:

$$\max_{q_{ij}^m, s_{ij}^m} \sum_{j,m}[(p_{ij}^m - \theta E_{ij}^m - \gamma_e t_{ij})q_{ij}^m - \gamma_p s_{ij}^m]$$
$$\text{s.t.} q_{ij}^m + s_{ij}^m = D_{ij}^m.$$

该问题存在闭式解. 定义边际利润$\pi_{ij}^m(\theta) = p_{ij}^m - \theta E_{ij}^m - \gamma_e t_{ij}$为扣除能耗成本与时间成本后的单位运输净收益, 当$\pi_{ij}^m(\theta) > -\gamma_p$时, 执行该运输任务是有利可图的, 最优决策为$q_{ij}^{m*} = D_{ij}^m, s_{ij}^{m*} = 0$; 否则, 放弃该任务更为经济, 最优决策为$q_{ij}^{m*} = 0$, $s_{ij}^{m*} = D_{ij}^m$.

b) 设施规划子问题 SP2-i 对每个节点$i\in\mathcal{I}$求解设施部署与补能需求分配:

$$\max_{x_i^k, \lambda_i^k} \sum_k [(\alpha^k(\theta) - \gamma_e w_i^k(\lambda_i^k, x_i^k))\lambda_i^k - \beta^k(\eta)x_i^k]$$
$$\text{s.t.} \lambda_i^k \leqslant \rho_{max}^k x_i^k.$$

其中$\alpha^k(\theta) = \theta\Omega(1-\varepsilon) - \gamma_h \bar{c}_i^k - \theta\omega_0 \bar{d}_i - \gamma_e(\bar{t}_i + t^k)$和$\beta^k(\eta) = (1+\eta)\gamma^k$分别表示单位补能需求的边际贡献和单位设施的边际建设成本. 子问题 SP2-i的求解采用枚举策略. 对每种补能模式k, 在二维空间(x_i^k, λ_i^k)上进行搜索: 首先枚举设施数量$x_i^k \in \{0, 1, 2, \ldots, x_{\max}\}$, 其中$x_{\max}$为合理上界; 对固定的$x_i^k$, 子问题关于$\lambda_i^k$为单变量优化问题, 可通过一维搜索或黄金分割法求解最优到达率λ_i^{k*}; 比较所有(x_i^k, λ_i^k)组合的目标值, 选择使目标最大的方案作为最优解.

2.3　次梯度迭代算法

定义对偶函数$D(\theta, \eta) = \sum_i D_i(\theta, \eta) + \eta b$, 其中$D_i(\theta, \eta)$为节点子问题最优值. 对偶问题为$\min_{\theta\geqslant 0, \eta\geqslant 0} D(\theta, \eta)$. 由于对偶函数为凸函数但通常不可微, 采用次梯度方法求解. 第t次迭代根据当前解$(\mathbf{x}^t, \mathbf{q}^t$, 计算次梯度. 能量平衡次梯度$g_\theta^t$为:

$$g_\theta^t = \sum_{i,j,m} E_{ij}^m q_{ij}^{m,t} + \sum_{i,k} \lambda_i^{k,t}\omega_0 \bar{d}_i - \sum_{i,k} \lambda_i^{k,t}\Omega(1-\varepsilon). \tag{31}$$

预算约束次梯度g_η^t为:

$$g_\eta^t = b - \sum_{i,k} \gamma^k x_i^{k,t}. \tag{32}$$

次梯度的符号反映了约束的违反方向. $g_\theta^t > 0$表示能耗超出补能供给, 需提高能量价格θ以抑制运输需求或激励补能设施部署. $g_\eta^t > 0$表示预算尚有盈余, 可降低设施成本惩罚η以鼓励更多投资. 根据次梯度方向更新拉格朗日乘子:

$$\theta^{t+1} = \max\{0, \theta^t - \alpha_t g_\theta^t\},$$
$$\eta^{t+1} = \eta^t - \beta_t g_\eta^t. \tag{33}$$

其中步长α_t和β_t按递减规则设定, 需满足条件$\sum_{t=1}^{\infty}\alpha_t = \infty$且$\sum_{t=1}^{\infty}\alpha_t^2 < \infty$以保证收敛性. 本文采用$\alpha_t = \alpha_0/\sqrt{t}$的形式, 其中$\alpha_0$为初始步长. 算法终止条件为次梯度范数足够小或达到最大迭代次数, 即当$|g_\theta^t| + |g_\eta^t| \leqslant \epsilon$或$t \geqslant T_{\max}$时停止迭代.

3　数值实验

3.1　实验设置与数据准备

本文选取大连港作为实证研究对象. 大连港年集装箱吞吐量超过 1 000 万 TEU, 其集疏运系统呈现典型的多层次空间结构. 基于 2023 年全年运营数据构建实验分析框架, 重点关注工作日运营高峰时段. 如图 3 所示, 集疏运网络包含 22 个节点, 按功能定位划分为五类. 港区节点 P1-P4 承担集装箱装卸与堆场作业, 近港区节点 N1-N6 作为缓冲与中转区域, 铁路枢纽节点 R1-R3 实现海铁联运功能, 内陆集散节点 I1-I6 服务于区域性货物集散, 远程腹地节点 H1-H3 连接东北腹地的长途运输需求. 节点间距离矩阵通过高德地图 API 基于实际地理坐标抓取真实道路里程构建, 行驶时间矩阵综合考虑港区限速 20 km/h、市区道路 40 km/h 和高速公路 80 km/h 等路况条件计算得出.

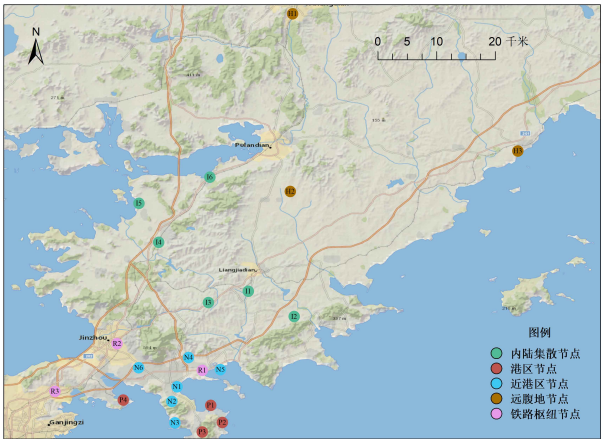

图 3　研究区域示意图

电动集卡技术参数、经济参数与设施服务参数的具体取值详见表 1. 其中技术参数的设置基于当前技术发展现状与港口运营特点. 电池容量Ω= 300 kWh, 根据载重情况可支持单次充电续航 75 至 170 公里. 能耗模型的参数标定参考了文献[24] 中同

吨位级别电动集卡的实车测功数据. 其中辅助系统功率系数ϕ_e和空气阻力系数ϕ_s依据车辆技术规格与风阻试验结果取值, 滚动阻力综合系数ϕ_w结合港口集疏运路面条件校核确定. 将标定参数代入 CMEM 模型, 在网络平均行驶速度$\bar{v}$=40 km/h 条件下, 重载工况能耗率为$e_{ij}^{\mathrm{DF}}=e_{ij}^{\mathrm{PF}}$=2.4 kWh/km, 空载工况能耗率为$e_{ij}^{\mathrm{PE}}=e_{ij}^{\mathrm{DE}}$=1.4 kWh/km, 两者差异反映了载重状态对能耗的显著影响.

表 1 主要参数设置

参数	含义	取值	参数	含义	取值
b	年化总投资预算设定	20000元	S	换电站配置的换电工位数量	2个
γ_h	时间价值系数	150元/h	K	补能设施排队等候位数	6位
γ_e	车辆运营成本系数	100元/h	ε	触发补能的电量阈值	0.2
γ^c	充电站建设年化单位成本	120元/h	$\bar{v}$	网络平均行驶速度	40 km/h
γ^s	换电站建设年化单位成本	500元/h	p_{ij}^m	运输任务(i,j)为m的单位收益	—
γ_p	未满足需求的单位惩罚成本	100元/次	D_{ij}^m	OD对(i,j)在模式m下的运输需求	—
Ω	电动重卡电池容量	300 kWh	t_{ij}	节点i到j的行驶时间	—
ω_0	空驶状态下的平均单位能耗	1.2 kWh/km	d_{ij}	节点i到j的行驶距离	—
C	充电站配置的充电桩数量	4个	e_{ij}^m	模式m的单位里程能耗率	—
B	换电站电池库存数量	8块	—	—	—

经济参数的设置综合考虑运营成本结构与市场价格水平. 时间价值系数γ_h=150 元/h, 反映商用车辆的机会成本. 车辆运营成本系数γ_e=100 元/h, 包括驾驶员工资、车辆折旧与维护等费用. 充电站建设年化单位成本γ^c=120 元/h, 换电站建设年化单位成本γ^s=500 元/h, 后者约为前者的 4.2 倍. 这一差异不仅源于换电站较高的初期固定资产投入, 还反映了其在电池折旧损耗和自动化设备维护等日常运营环节更高的单位成本. 因此, 本文在设定年化单位成本γ^c与γ^s时, 不仅涵盖了基础建设投资, 还综合折算了两者在日常运维与服务模式上的显著成本差异. 未满足需求的惩罚成本γ_p=100 元/次, 用于刻画市场份额损失的经济代价. 基准情景下, 年化总投资预算设定为b=20000 元/h.

补能设施的服务参数设置方面, 充电站配置$C=4$个充电桩, 采用直流快充技术, 平均充电时间$t^c=0.75$ h. 换电站配置$S=2$个换电工位, 单次换电时间$t^s=0.1$ h, 电池库存$B=8$块, 电池充电时间$\tilde{t}^c=1.5$ h. 两类设施的等候位数量均设定为$K=6$. 算法参数设置方面, 初始拉格朗日乘子$\theta^0=\eta^0=0$, 初始步长$\alpha_0=\beta_0=1000$, 收敛阈值$\epsilon=100$, 最大迭代次数$T_{\max}=300$, 辅助参数$\xi=1\times10^{-2}$. 所有实验在配置 Intel Core i7-12700 处理器、32GB 内存的计算平台上完成, 算法采用 Python 3.9 实现.

为全面评估充换电协同规划策略的有效性, 本文考虑三种对比方案在相同预算约束下进行优化. (i) 协同规划模式: 允许在网络中同时部署充电站与换电站, 由模型优化确定两类设施的最优配置组合, 代表本文提出的规划策略. (ii) 纯充电模式: 限制$x_i^s=0, \forall i\in\mathcal{I}$, 仅允许部署充电站, 代表当前主流的单一技术路线. (iii) 纯换电模式: 限制$x_i^c=0, \forall i\in\mathcal{I}$, 仅允许部署换电站, 代表高效率导向的极端策略.

3.2 算法性能验证

拉格朗日分解算法呈现收敛误差即次梯度范数随迭代次数的变化趋势, 误差在前 50 次迭代内快速下降, 随后进入平稳收敛阶段, 约在 200 次迭代后达到收敛阈值. 拉格朗日乘子θ和η均呈现先剧烈波动后趋于稳定的特征, 最终收敛至各自的均衡值.

需要指出的是, 由于原问题含整数变量且具有非凸性, 原问题与对偶问题之间存在对偶间隙, 次梯度范数在逼近对偶最优后会在间隙附近振荡而非单调趋零, 这是拉格朗日对偶分解算法的固有特点[25]. 收敛阈值$\epsilon=100$相对于目标函数值约 50,000 仅占 0.2%, 精度足以满足战略规划层面的决策需求. 此外, 以不同初始乘子重复求解, 最终目标值波动不超过 0.5%, 设施部署方案完全一致, 验证了算法输出的稳定性. 基准算例的求解时间约为 45 秒, 计算效率能够满足实际规划需求.

3.3 经济效益与运营效率分析

表 2 对比了三种规划模式下的成本收益构成. 协同规划策略的系统总收益达到 50298.18 元, 分别较纯充电模式和纯换电模式提高 18.46% 和 4.17%, 验证了充换电协同部署在经济效益上的优越性. 以下从各成本分项的构成角度分析协同策略的优势来

源. 纯充电模式的建设成本最低, 但其较低的补能效率导致了高昂的时间成本和车队运营成本, 两项合计较协同规划高出 13 328.78 元, 远超其节省的建设成本 5 490.00 元, 从而制约了整体收益水平. 纯换电模式的运营效率最高, 补能成本与车队运营成本均为三种模式中最低, 但过高的固定资产投入削弱了其经济表现.

表 2　不同规划策略经济效益对比

规划模式	总收益(元)	建设成本(元)	补能成本(元)	车队运营成本(元)
协同规划	**50,298.18**	13,860.00	42,702.45	319,082.40
纯充电模式	42,459.40	**8,370.00**	46,684.68	328,428.95
纯换电模式	48,284.98	15,825.00	**38,288.40**	**316,270.43**

协同规划策略通过组合部署两类设施, 实现了建设成本与运营成本的系统性权衡. 具体而言, 该策略在高需求节点部署少量换电站以保障运营效率, 在其他节点广泛部署充电站以控制建设成本, 既避免了纯充电模式的效率瓶颈, 又规避了纯换电模式的投资冗余, 最终实现了系统总成本的最小化与总收益的最大化.

图 4 从运营效率角度对比了三种策略下各节点的平均补能时间, 该指标综合反映了车辆的在途时间、排队等待时间与服务时间. 纯充电模式的全网平均补能时间最高, 达到 1.29 小时, 且在港区节点 P1-P4 和远腹地节点 H1-H3 出现明显的时间峰值. 该现象直观反映了单一慢速补能网络在应对高峰期集中需求时的效率瓶颈. 充电服务时间长导致车辆在设施处大量积压, 形成系统性拥堵, 进而降低车队周转效率. 纯换电模式凭借分钟级的补能速度将全网平均补能时间压缩至最低水平, 代表了理想状态下的时间效率上限. 然而, 如前文分析所示, 该模式需要承担过高的建设成本, 在有限预算约束下难以实现全网络的高密度覆盖.

协同规划模式的全网平均补能时间为 0.87 小时, 较纯充电模式降低 32.54%, 在两个极端模式之间取得了有效平衡. 从空间分布看, 协同模式下各节点的补能时间更加均衡, 避免了纯充电模式中港区与腹地节点的严重拥堵. 主要改善源于换电站在关键节点的战略性部署. 通过在需求最集中的港区主节点配置换电设施, 有效分流了高峰期的刚性补能需求, 缓解了充电网络的排队压力, 从而实现了全网运营效率的整体提升. 补能时间的缩短直接转化为经济效益的改善. 在基准情景下, 协同规划相对于纯充电模式节约的补能时间成本约为 3 982 元/小时. 该结果与表 2 中两种模式补能成本的差额 3 982.23 元高度吻合, 验证了运营效率提升是协同策略经济优势的核心来源.

3.4　补能需求流量与设施空间布局分析

图 5 展示了网络中潜在补能需求与实际补能服务流量的空间分布特征. 左侧主 Y 轴代表各节点的潜在补能需求 (柱状图), 右侧次 Y 轴代表实际接受服务的补能车辆流量 (折线图). 潜在补能需求呈现显著的双峰分布, 港区节点 P1-P4 因承担高频短倒作业而产生大量补能需求, 远程腹地节点 H1-H3 则因长途运输的高能耗特性形成另一需求高峰, 该分布特征与港口集疏运的运营模式高度契合. 值得关注的是, 实际补能流量的空间分布与潜在需求存在显著错位, 反映了协同规划策略的需求重构现象.

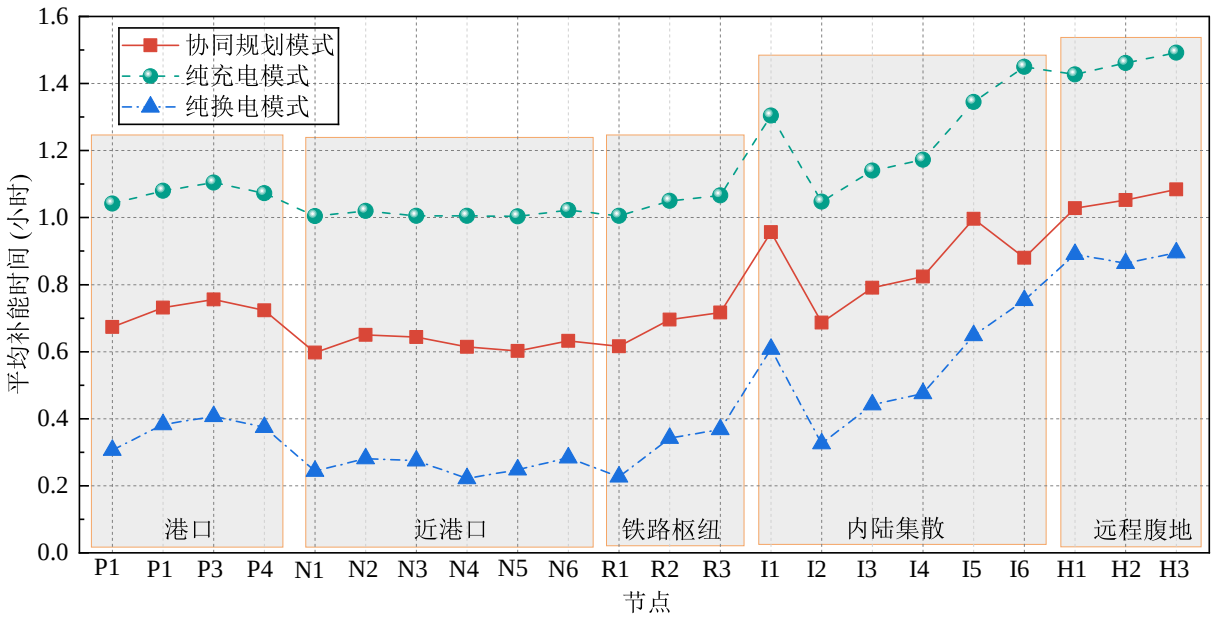

图 4　不同规划策略的平均补能时间对比

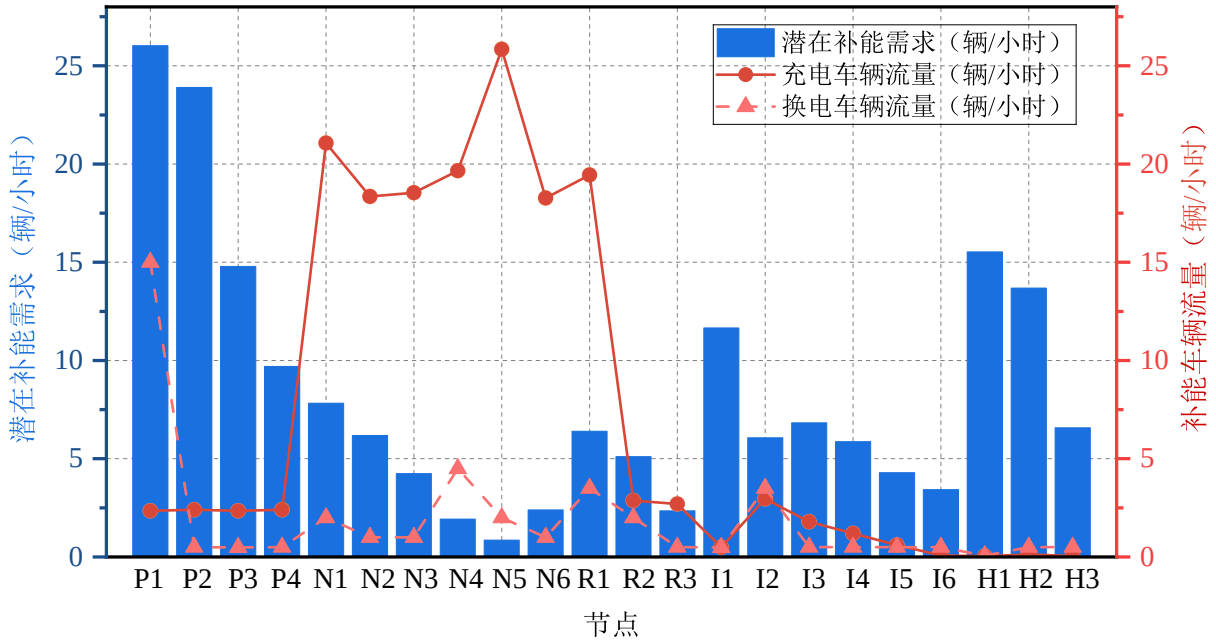

图 5　潜在补能需求与补能车辆分布

具体表现为: 首先, 近港区节点 N1-N6 承担了全网最高的充电服务流量, 尽管其本地潜在需求相对有限. 该现象表明大量源自港区的补能需求被引导至近港区的充电网络, 利用该区域较低的土地成本与充裕的空间资源消化基础补能负荷, 实现需求的空间转移与成本优化. 其次, 换电服务流量高度集中于核心港区节点 P1, 与该节点的高需求强度精准匹配. 换电站凭借零等待的高吞吐特性, 就地解决港区最紧迫的刚性补能需求, 发挥了关键的削峰与定点保障作用. 此外, 铁路枢纽节点 R1 与部分内陆节点 I2 呈现充换电并存的混合服务模式, 兼顾了日常运营的成本控制与高峰时段的效率保障.

充电站与换电站的优化布局方案呈现显著的空间集聚性与功能差异化特征. 在空间分布层面, 绝大部分设施高度集中于港区、近港区及核心铁路枢纽等核心作业圈层, 形成了围绕高频运输任务的高密度补能网络. 内陆集散节点根据需求强度进行了选择性覆盖, 而远程腹地节点则基于成本效益原则采取了战略性放弃, 其补能需求通过沿途节点或返程途中满足. 该布局体现了有限资源向高价值区域集中的规划原则. 在功能定位层面, 充电站与换电站形成了明确的互补协同关系. 换电站被精准部署在港区主节点 P1, 以其分钟级的补能速度保障港区核心作业的运行效率, 有效避免高峰时段的车辆积压. 充电站则在近港区 N1-N6 进行大规模网络化部署, 利用其成本优势满足车队的基础补能需求与弹性补能需求. 此外, 铁路枢纽 R1 与关键内陆中转节点 I2 采用了充换电混合配置模式, 兼顾海铁联运的高时效要求与常规集散的成本控制. 从设施数量配比看, 协同规划方案共部署充电站 51 座和换电站 6 座, 换电站数量仅占总设施数的 10.5%, 但其战略价值不可替代. 该配置表明, 在预算约束下, 以充电站构建广覆盖的基础网络, 同时以换电站保障关键节点的运营效率, 是实现系统效益最优的有效途径.

3.5　敏感性分析

a) 预算约束的影响 为探究投资规模对协同规划策略的影响, 本文对总预算参数进行敏感性分析, 结果如表 3 所示. 分析结果揭示了预算约束对补能网络结构与系统效益的深刻影响. 随着预算从 10000 元增加至 30000 元, 系统总收益提升 24.50%, 验证了基础设施投资对运营效益的正向促进作用.

表 3　预算约束的敏感性分析

总预算 (元)	总收益 (元)	建设成本 (元)	补能成本 (元)	车队运营成本(元)	充电站	换电站
10000	43,070.36	9270	47,786.25	325,816.42	50	2
20000	50,298.18	13,860	42,702.45	319,082.40	51	6
30000	53,624.32	16,260	40,256.40	315,802.31	47	12

从设施配置演变看, 投资策略呈现明确的技术路线转换特征. 在预算紧张时, 模型倾向于建设成本较低的充电站以实现基础网络覆盖, 仅配置 2 个换电站用于保障核心节点的运营效率. 随着预算放宽, 投资重心逐步向换电站转移. 当预算增至 30000 元时, 换电站数量增加至 12 个, 而充电站数量反而下降至 47 个. 该转变说明, 换电站虽然建设成本高, 但其带来的补能成本与车队运营成本节约更为显著, 在预算充裕时成为更具效益的投资选择. 值得注意

的是, 即使在最紧张的预算情景下, 模型仍保留了2 座换电站. 这表明少量换电站的战略部署对于维持系统运行效率具有不可替代的价值, 反映了充换电协同部署的结构性优势.

b) 运输需求波动的影响 为评估所提协同部署方案在面对中长期运输需求波动时的适应能力, 本文引入运输需求强度系数 (从 0.6 至 1.4) 进行敏感性分析, 考察在需求萎缩与激增场景下基础设施网络的运营表现, 实验结果如表 4 所示. 实验结果表明, 在需求强度变化超过一倍的区间内, 多模式补能网络的各性能指标保持稳定. 换电站的平均利用率几乎不受需求波动的影响, 始终维持在 99.87% 的满载状态; 充电站的平均利用率则随需求增加稳步上升, 由需求强度 0.6 时的 35.76% 攀升至 1.4 时的 46.81%, 仍有充裕的服务余量. 全网平均补能时间表现平稳, 仅从 0.84 小时微升至 0.94 小时.

表 4　运输需求的敏感性分析

运输需求强度	充电站平均利用率	换电站平均利用率	平均补能时间(h)
0.6	35.76%	99.87%	0.84
0.8	38.46%	99.87%	0.86
1	40.55%	99.87%	0.87
1.2	43.75%	99.87%	0.90
1.4	46.81%	99.87%	0.94

上述现象的成因在于充换电设施在功能上的互补分工. 换电站凭借高服务效率始终优先以满载状态运作, 承担稳定的基础补能需求, 保障核心节点的车队周转效率. 需求波动带来的增量则由布局更广且建设成本更低的充电站网络吸收和消化. 这一分工有效避免了单一充电模式在高峰时段易发的严重排队拥堵, 同时也规避了单一换电模式在低谷时段的资产闲置风险. 综上, 所规划的充换电协同网络对中长期需求波动具有良好的适应能力, 能够在较宽的需求区间内维持稳定的服务水平.

c) 换电站建设成本的影响 换电站建设成本的不确定性是影响规划决策的重要因素. 随着换电技术的成熟与规模化应用, 其建设成本有望逐步下降. 但在特定区域, 土地稀缺与环保要求也可能推高建设成本. 为评估该参数变化对协同规划的影响, 本文进行敏感性分析, 结果如表 5 所示. 分析结果显示, 换电站建设成本对最优决策具有根本性影响. 当建设成本从 300 元增加至 600 元时, 最优方案中的换电站数量从 21 个急剧减少至 4 个, 充电站数量则从 35 个增加至 52 个, 系统总收益下降 31.07%.

成本结构的变化清晰揭示了换电站的效率价值.

表 5　换电站建设成本的敏感性分析

换电站建设成本(元)	总收益(元)	建设成本(元)	补能成本(元)	车队运营成本(元)	充电站	换电站
300	64,135.88	11,595.00	37,735.80	312,247.34	35	21
450	57,127.45	12,225.00	31,901.45	316,099.13	37	15
600	44,201.77	9,930.00	47,008.50	324,803.76	52	4

在低建设成本情景下, 换电站的高效率特性得以充分发挥, 系统实现了最低的补能成本与车队运营成本, 总收益达到所有情景中的最高水平. 随着建设成本上升, 换电站的边际效益递减, 模型逐步以充电站替代换电站. 然而, 此种替代也大幅降低系统效率. 高建设成本情景下, 虽然建设成本有所降低, 但补能成本与车队运营成本的大幅上涨远超建设成本的节约, 导致系统总收益严重下滑.

4　结　论

本文得到以下主要结论:

(1) 协同规划策略的系统总收益较纯充电模式提升 18.46%, 较纯换电模式提升 4.17%. 纯充电模式建设成本最低但补能效率不足导致时间成本与车队运营成本大幅增加, 纯换电模式运营效率最优但过高的固定资产投入削弱其经济表现. 协同模式通过组合部署两类设施, 在保障关键节点服务效率的同时控制总体投资规模, 实现了建设成本与运营效率的有效平衡.

(2) 最优布局呈现显著的功能差异化特征. 换电站应优先部署于需求最密集的港区核心节点, 利用其分钟级补能速度保障高峰时段车队周转效率. 充电站则适合在近港区进行网络化布局, 利用成本优势满足基础补能需求. 该差异化策略使全网平均补能时间较纯充电模式降低 32.54%.

(3) 敏感性分析表明, 预算约束与换电站建设成本对最优配置具有显著影响, 但即使在预算紧张或建设成本较高的情景下, 模型仍倾向于保留少量换电站. 该结果揭示了换电站在港口集疏运场景中不可替代的战略价值, 其高吞吐能力对于应对需求峰值和维持车队利用率具有关键作用.

上述结论基于给定参数条件与确定性需求预测得出. 在工程实施中, 港区土地资源稀缺性、区域配电网扩容承载力以及各地差异化补贴政策等现实约束将影响规划方案的落地效果. 未来研究可沿以下方向拓展, 包括将土地与配电网容量约束显式纳入规划模型, 构建适应差异化补贴政策的参数调整框架, 以及引入随机规划或鲁棒优化方法应对需求不确定性.

参考文献 (References)

[1] 江志娟, 陈美玲, 魏昕恬, 等. 中重型纯电动卡车的减污降碳潜力研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(5): 353-364.
(Jiang Z J, Chen M L, Wei X T, et al. Assessment of pollution and carbon reduction potential of medium-and heavy-duty battery electric trucks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(5): 353-364.)

[2] Sharifi F, Burris M, Quadrifoglio L, et al. Electric truck feasibility for port drayage operations: Port Houston case study[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 135: 104355. [LinkOut].

[3] Xiao L Y, Chen L X, Sun P, et al. The container drayage problem for electric trucks with charging resource constraints[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2025, 174: 105100. [LinkOut].

[4] Lai Z J, Li S. Towards a multimodal charging network: Joint planning of charging stations and battery swapping stations for electrified ride-hailing fleets[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2024, 183: 102928. [LinkOut].

[5] Prohaska R, Konan A, Kelly K, et al. Heavy-duty vehicle port drayage drive cycle characterization and development[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2016, 9(2): 331-338. [LinkOut].

[6] Liimatainen H, van Vliet O, Aplyn D. The potential of electric trucks–An international commodity-level analysis[J]. Applied Energy, 2019, 236(C): 804-814. [LinkOut].

[7] Bragin M A, Ye Z Z, Yu N P. Toward efficient transportation electrification of heavy-duty trucks: Joint scheduling of truck routing and charging[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 160: 104494. [LinkOut].

[8] He J, Yang H, Tang T Q, et al. An optimal charging station location model with the consideration of electric vehicle's driving range[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 86: 641-654. [LinkOut].

[9] Sadeghi-Barzani P, Rajabi-Ghahnavieh A, Kazemi-Karegar H. Optimal fast charging station placing and sizing[J]. Applied Energy, 2014, 125(C): 289-299. [LinkOut].

[10] Zeng X Q, Xie C, Xu M, et al. Optimal en-route charging station locations for electric vehicles with heterogeneous range anxiety[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 158: 104459. [LinkOut].

[11] 曹慕昆, 王逸诚, 刘新龙, 等. 轨迹数据驱动的新能源汽车充电站选址模型研究[J]. 控制与决策, 2025, 40(9): 2739-2747.
((Cao M K, Wang Y C, Liu X L, et al. Research on location model of new energy vehicle charging station driven by trajectory data[J]. Control and Decision, 2025, 40(9): 2739-2747.) [万方].)

[12] Wang Y, Ding W J, Huang L S, et al. Toward urban electric taxi systems in smart cities: The battery swapping challenge[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 1946-1960. [LinkOut].

[13] 余冰, 刘勇, 马良. 电动汽车充换放储一体站选址定容双层规划模型及算法[J]. 运筹与管理, 2025, 34(7): 24-31.
((Yu B, Liu Y, Ma L. Bi-level model and algorithm for locating and sizing electric vehicle charging-swapping-discharging-storage integrated station[J]. Operations Research and Management Science, 2025, 34(7): 24-31.) [万方].)

[14] 王瀚青, 姚恩建, 张天雨, 等. 面向集中充电式换电网络的充换电站联合规划[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2026, 66(3): 651-660.
((Wang H Q, Yao E J, Zhang T Y, et al. Joint planning of battery charging and swapping stations for centralized-charging battery swapping networks[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2026, 66(3): 651-660.) [维普].)

[15] Tan X Q, Sun B, Tsang D H K. Queueing network models for electric vehicle charging station with battery swapping[C]. 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Venice, 2015: 1-6. [LinkOut].

[16] Zhang J, Bai L H, Jin T D. Joint planning for battery swap and supercharging networks with priority service queues[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 233: 108009. [LinkOut].

[17] Diao X D, Qiu M. Service network design for electric vehicles with combined battery swapping and recharging[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2026, 208(C): 104668 [LinkOut].

[18] 胡俊杰, 王博辉, 潘羿, 等. 面向电网源荷均衡的规模化电动重卡充换电协同调度[J]. 电网技术, 2026, 50(7): 2718-2729.
((Hu J J, Wang B H, Pan Y, et al. Coordinated charging and swapping scheduling of large-scale electric heavy-duty trucks oriented to grid source-load balance[J]. Power System Technology, 2026, 50(7): 2718-2729.) [万方].)

[19] 缪鸿志, 王俊朋, 吴佳雨, 等. 考虑交通-电力两网交互的电动集卡超充设施规划方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2026, 26(1): 305-317.
((Miao H Z, Wang J P, Wu J Y, et al. Collaborative planning of electric truck supercharging infrastructure considering transportation-power network interactions[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2026, 26(1): 305-317.) [万方].)

[20] Ye Z Z, Yu N P, Wei R. Joint planning of charging stations and power systems for heavy-duty drayage trucks[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 134: 104320. [LinkOut].

[21] 蔡凌, 郭戈, 施冷安东. 考虑差异化需求的电动汽车充电调度策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 795-803.
((Cai L, Guo G, Shi L A D. Electric vehicle charging scheduling strategy considering differentiated demand[J]. Control and Decision, 2024, 39(3): 795-803.) [万方].)

[22] 乔沙, 冯俊娥, 李景叶. 连续时间马尔可夫链的近似互模拟[J]. 控制与决策, 2026, 41(1): 101-111.
((Qiao S, Feng J E, Li J Y. Approximate bisimulations for continuous-time Markov chains[J]. Control and Decision, 2026, 41(1): 101-111.) [万方].)

[23] 袁音, 李树凯, 陈泽彬, 等. 城市轨道交通网络列车运行调整与速度曲线选择实时优化[J]. 控制与决策, 2025, 40(11): 3415-3423.
((Yuan Y, Li S K, Chen Z B, et al. Real-time optimization for train rescheduling and speed profile selection in urban rail transit networks[J]. Control and Decision, 2025, 40(11): 3415-3423.) [万方].)

[24] Çabukoglu E, Georges G, Küng L, et al. Battery electric propulsion: An option for heavy-duty vehicles? Results from a Swiss case-study[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 88: 107-123. [LinkOut].

[25] Bragin M A. Survey on Lagrangian relaxation for MILP: Importance, challenges, historical review, recent advancements, and opportunities[J]. Annals of Operations Research, 2024, 333(1): 29-45. [LinkOut].

作者简介

缪鸿志 (1992−), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为新兴技术影响下的交通运输规划与管理, E-mail: miao@dlmu.edu.cn;

吴佳雨 (2001−), 男, 硕士生, 主要研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: wjy2171074445@163.com;

李歆蔚 (1989−), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为国际法、程序法、争端解决, E-mail: lxw@dlmu.edu.cn;

郑建风 (1981−), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为复杂网络、枢纽选址、航线网络设计及港航运输规划与管理优化, E-mail: jfzheng@dlmu.edu.cn.