

控制与决策

Control and Decision

需求可离散拆分电动汽车充电策略和路径优化问题

邢玉伟, 王展华, 杨华龙

引用本文:

邢玉伟, 王展华, 杨华龙. 需求可离散拆分电动汽车充电策略和路径优化问题[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 987-995.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0161>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划](#)

Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization

控制与决策. 2021, 36(6): 1397-1406 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1323>

[基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制](#)

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 885-892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

[融合能量周期性递减与牛顿局部增强的改进HHO算法](#)

[Improved harris hawks optimization coupling energy cycle decline mechanism and Newton local enhancement strategy](#)

控制与决策. 2021, 36(3): 629-636 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0810>

[基于预防维护的单机调度问题](#)

[Single-machine scheduling problem with preventative maintenance activities](#)

控制与决策. 2021, 36(2): 395-402 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0626>

[改进型灰狼算法在热电偶动态补偿中的应用](#)

Application of improved grey wolf algorithm in dynamic compensation of thermocouple

控制与决策. 2021, 36(1): 61-67 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0688>

需求可离散拆分电动汽车充电策略和路径优化问题

邢玉伟[†], 王展华, 杨华龙

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对电动汽车的物流配送问题, 考虑到客户需求可以拆分成若干离散订单的特性, 以最小化电动汽车的固定成本、路径行驶成本、充电成本以及时间窗惩罚成本为目标, 构建需求可离散拆分的多车型电动汽车充电策略和路径优化模型. 针对模型特点, 设计改进的遗传-模拟退火算法. 为验证算法的有效性进行算例分析, 结果表明, 考虑需求可离散拆分的情况下, 该算法能够快速优化出电动汽车的充电策略和配送路径, 其中部分充电策略不仅能够缩短充电时间, 而且能够大幅度降低总成本. 敏感性分析结果显示, 充电等待时间增加会导致两种策略的时间窗惩罚成本上升, 但部分充电策略的成本增速显著低于完全充电策略, 尤其适用于充电等待时间较长的情况. 所做的研究能够为物流企业电动汽车配送优化提供重要参考.

关键词: 电动汽车; 充电策略; 车辆路径优化; 需求可离散拆分; 改进的遗传-模拟退火算法

中图分类号: U116.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0161

引用格式: 邢玉伟, 王展华, 杨华龙. 需求可离散拆分电动汽车充电策略和路径优化问题 [J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 987-995.

Electric vehicle charging strategies and routing optimization under discrete split demands

XING Yu-wei[†], WANG Zhan-hua, YANG Hua-long

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: This study endeavors to optimize the logistical distribution of electric vehicles (EVs), considering the characteristic that customer demand can be split into several discrete orders. With the objective of minimizing the fixed, routing, charging, and time window penalty costs for the EVs, a multi-type EV charging strategies and routing optimization model is formulated that considers discrete split demands. Given the characteristics of this model, an improved genetic-simulated annealing algorithm is designed. The effectiveness of the algorithm is validated through empirical analysis. The findings indicate that the algorithm can efficiently optimize EV charging strategies and distribution routes under discrete split demands. Notably, the partial charging strategy not only reduces total costs but also shortens charging time compared to the full charging strategy. Furthermore, sensitivity analysis reveals that as charging waiting time increases, the time window penalty costs rise for both strategies. However, the cost growth rate for the partial charging strategy is notably lower than that of the full charging strategy, suggesting its superior suitability in scenarios involving prolonged charging waiting times. This research offers valuable guidance for logistics companies seeking to optimize EV distribution operations.

Keywords: electric vehicle; charging strategies; vehicle routing problem; discrete split demands; improved genetic-simulated annealing algorithm

0 引言

随着全球对环境保护和可持续发展的重视, 电动汽车作为减少碳排放、促进能源转型的重要手段, 其市场渗透率正逐年上升. 然而, 电动汽车的广泛应用也带来了新的挑战, 其中之一便是如何高效地规划电动汽车的充电和配送路径, 以最大化利用有限

的充电资源并满足多样化的客户需求.

传统的车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP), 作为运筹学领域内的关键问题, 致力于优化客户节点的访问顺序和路径, 以最小化总成本. 然而, 当将研究对象转向电动汽车时, 问题变得更加复杂, 因为电动汽车的行驶范围受限于电池电量, 且充电

收稿日期: 2024-02-16; 录用日期: 2024-07-28.

基金项目: 辽宁省社会科学规划基金项目 (L21CJY004).

责任编辑: 郭戈.

[†]通信作者. E-mail: xingyuwei1990@dlnu.edu.cn.

过程会显著影响路径选择和总成本. 部分学者对电动汽车路径问题 (electric vehicle routing problem, EVRP) 展开了研究, 如郭戈等^[1]总结了 EVRP 的研究现状, 深入分析了充电优化、路径优化及车队配置优化等方面的问题特点及求解方法. Qin 等^[2]进一步探索 EVRP 的多种变体及其对应的求解算法, 并评估了不同算法在解决这些问题上的效果和适用性. Schiffer 等^[3]从物流网络综合规划的角度出发, 分析了电动汽车的经济可行性以及环境效益. 然而, 这些文献并未强调电动汽车的充电策略.

充电策略直接关系到物流企业的运营成本和客户满意度, 因此, 在电动汽车车辆路径优化中纳入充电因素至关重要. 程坦等^[4]针对 EVRP 采用部分充电策略, 进而构建了带有时间窗约束的混合整数线性规划模型. 葛显龙等^[5]建立了整数规划模型, 旨在优化考虑灵活充电策略的电动汽车物流配送路径. Raeesi 等^[6]提出了电动汽车协同路径优化模型, 通过协调途中充电和换电服务来优化配送路线. 蔡凌等^[7]则专注于电动汽车充电站的资源分配, 研究了如何通过差异化的充电调度策略提升充电效率. 王伟权等^[8]在线性充电策略下研究了多车型电动汽车的配送路径优化问题. 吴廷映等^[9]进一步考虑载重对电动汽车耗电率的影响, 并据此构建了优化的路径规划模型. Guo 等^[10-13]针对单向电动汽车共享系统, 通过车辆供需重平衡、多等级充电策略等措施, 优化车辆分配和充电管理, 提升了系统运营效率和服务质量.

除了充电策略外, 当客户需求量超过电动汽车的最大载重量时, 如何合理拆分客户需求并进行配送, 也是电动汽车路径优化中不可忽视的一环. 当前, 关于需求可拆分情境下路径优化问题 (split delivery vehicle routing problem, SDVRP) 的研究多聚焦于传统燃油车领域. 如范厚明等^[14]深入剖析了在时间窗偏好、同时配集货以及需求可拆分等复杂约束条件下, 如何优化车辆路径安排的问题. Guo 等^[15]研究了带有不兼容装载约束及按订单拆分交付的车辆路径问题, 并设计了启发式算法进行求解. Ferreira 等^[16]提出了一种启发式算法解决 SDVRP. 符卓等^[17]研究了带软时间和订单拆分特性的 VRP, 并利用禁忌搜索算法优化路径. 然而, 针对电动汽车的研究还相对较少, 揭婉晨等^[18]虽然针对 SDVRP 建立了整数线性规划模型, 并设计改进的分支定界算法进行求解, 但其假设客户节点的需求按照计量单位 (件或个) 进行连续拆分, 而在实际的配送过程中, 需求一般以订单 (或批次) 为单位进行包装, 各个订单 (或批次) 相

互独立, 且包含的货物数量不尽相同, 因此需求是离散的.

基于上述分析, 本文深入研究需求可离散拆分情况下, 电动汽车充电策略制定、多车型车辆配置优化以及配送路径的规划问题. 具体研究扩展如下: 1) 针对复杂的客户需求, 将其按订单进行拆分, 确保每份订单独立且不可再分, 同时考虑到订单间需求量的差异性, 实现需求的离散化处理; 2) 结合物流配送需求, 将最小化总成本作为目标, 构建多车型电动汽车充电策略和路径优化模型; 3) 利用改进的遗传-模拟退火算法求解上述模型, 提高求解的速率和质量.

1 问题描述和模型建立

1.1 问题描述

某物流企业选用不同型号的电动汽车作为配送工具, 为分布在特定区域内的客户提供服务. 电动汽车从配送中心出发, 完成配送任务后需返回配送中心. 这些电动汽车能够依次访问多个客户节点, 但需遵循每个客户设定的时间窗限制. 面对复杂的订单需求, 物流企业计划将每个客户节点的订单拆分成若干子订单, 然后将子订单分配给不同车辆进行配送, 以确保每个客户节点的需求都能得到满足. 然而, 在配送过程中, 由于电动汽车续航里程有限, 电量不足时, 车辆需在最近的充电站点进行充电, 以继续服务其他客户节点. 充电站允许多次访问, 以满足车辆的充电需求. 针对电动汽车的充电问题, 物流企业提出了两种策略: 一种是部分充电策略, 即允许电动汽车根据自身需求选择非满电状态下的充电量; 另一种是完全充电策略, 即要求电动汽车每次充电后必须达到满电状态. 鉴于配送过程中的续航挑战和充电需求, 本文研究的关键问题是: 在客户需求可离散拆分的情况下, 如何优化电动汽车的充电策略与配送路径, 以最小化物流公司的总成本. 具体配送情况如图 1 所示.

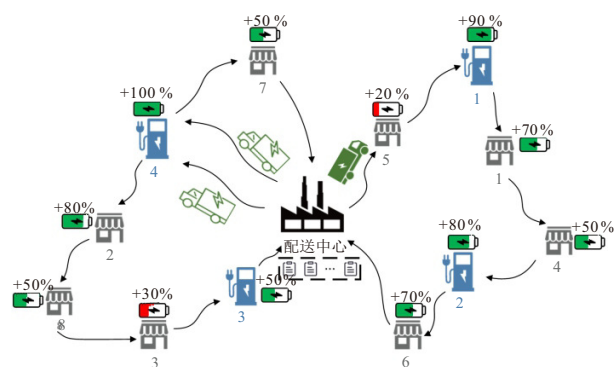


图1 需求可离散拆分电动汽车配送情况

1.2 问题假设与符号定义

1.2.1 问题假设

- 1) 车辆从配送中心出发时, 电量达到其上限;
- 2) 每个充电站的访问次数不受限制;
- 3) 车辆在客户节点的装卸时间忽略不计;
- 4) 车辆驶离配送中心的时刻为 0;
- 5) 车辆在配送过程中的行驶速度保持不变。

1.2.2 符号定义

- 1) 集合:
 O 为配送中心;
 N 为客户节点集合;
 P 为充电站点集合;
 K 为配送车辆集合, $k \in K$;
 V 为全部节点集合, $V = O \cup N \cup P$;
 V_k 为车辆 k 行驶路径上经过的节点集合;
 M_i 为客户节点 i 的需求订单拆分集合。

2) 参数:

p_i 为客户节点 i 的需求量, 即车辆在 i 点所需配送的货物数量;

- p_i^r 为客户节点 i 第 r 个订单的需求量;
 d_{ijk} 为车辆 k 由节点 i 行驶至节点 j 的实际距离;
 U_k 为车辆 k 的载货量上限;
 Q_k 为车辆 k 的电量上限;
 q_{ik}^1 为车辆 k 抵达节点 i 时的电量;
 q_{ik}^2 为车辆 k 驶离节点 i 时的电量;
 $[e_i, l_i]$ 为客户节点 i 的时间窗限制;
 t_{ik}^1 为车辆 k 抵达节点 i 的时间;
 t_{ik}^2 为车辆 k 驶离节点 i 的时间;
 tw_{ik} 为车辆 k 在节点 i 的等待时长;
 ts_{ik} 为车辆 k 在客户节点 i 的服务耗时;
 tc_{ik} 为车辆 k 在充电站 i 的充电时长;
 t_{ijk} 为车辆 k 由节点 i 行驶至节点 j 所花费的时间;
 v 为车辆的平均行驶速度;
 g 为车载电池的充电系数;
 h 为车载电池的消耗系数;
 epu 为车辆早于客户要求的时间窗到达时单位惩罚成本;
 lpu 为车辆晚于客户要求的时间窗到达时单位惩罚成本;
 f_k 为车辆 k 的单位固定成本;
 c_k 为车辆 k 的每公里的行驶成本;
 c_{ps} 为每小时的充电费用;
 u_{ik}^1 为车辆 k 进入客户节点 i 的载重量, $i \in V_k \cap N$;

u_{ik}^2 为车辆 k 离开客户节点 i 的载重量, $i \in V_k \cap N$ 。

3) 决策变量:

x_{ijk} 为 0-1 变量, 车辆 k 选择从节点 i 驶至节点 j 取 1, 否则取 0;

y_{ik} 为 0-1 变量, 车辆 k 选择驶至节点 i 取 1, 否则取 0;

w_{ijk} 为 0-1 变量, 车辆 k 选择驶离节点 i 到充电站 j 充电取 1, 否则取 0;

z_{ir}^k 为 0-1 变量, 客户点 i 的第 r 个订单由车辆 k 配送取 1, 否则取 0。

1.3 部分充电策略下多车型协同配送模型

在部分充电策略下, 电动汽车的充电电量并非基于电池的剩余容量, 而是根据后续配送任务的需求来确定。配送任务的总电量计算及充电函数可参见文献 [19]。具体而言, 车辆 k 驶离客户点 i 抵达充电站 j 后, 为了完成剩余客户点配送任务, 所需电量为

$$r_{ijk} = d_{jlk}h + \sum_{l \in N \cap V_k} (d_{lmk}h), \quad \forall k \in K, j \in P, i, l, m \in N \cap V_k. \quad (1)$$

此时的充电量 F_{ijk} 可表示为

$$F_{ijk} = \begin{cases} r_{ijk} - q_{jk}^1, & r_{ijk} - q_{jk}^1 < Q_k; \\ Q_k - q_{jk}^1, & r_{ijk} - q_{jk}^1 \geq Q_k. \end{cases} \quad \forall i \in N \cap V_k, j \in P, k \in K. \quad (2)$$

在完全充电策略下, 车辆 k 驶离节点 i 到充电站 j 后所充电量由当前电池所消耗的电量来决定, 此时 F_{ijk} 可表示为

$$F_{ijk} = Q_k - q_{jk}^1, \quad \forall i \in N \cap V_k, j \in P, k \in K. \quad (3)$$

基于上述分析, 构建需求可离散拆分电动汽车充电策略和路径优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} f_k x_{Ojk} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_k d_{ijk} x_{ijk} + \\ & c_{ps} \sum_{i \in P} \sum_{k \in K} tc_{ik} + epu \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} y_{ik} \max\{(e_i - t_{ik}^1), 0\} + \\ & lpu \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} y_{ik} \max\{(t_{ik}^1 - l_i), 0\}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in V} x_{Ojk} \leq 1, \quad \forall k \in K; \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{Ojk} \leq |K|; \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} x_{jik} - \sum_{i \in V, i \neq j} x_{ijk} = 0, \quad \forall j \in V, k \in K; \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in M_i} p_i^r z_{ir}^k = p_i, \forall i \in N; \quad (8)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{r \in M_i} p_i^r z_{ir}^k \leq U_k, \forall k \in K; \quad (9)$$

$$0 \leq u_{jk}^1 \leq u_{ik}^1 - p_i x_{ijk} + U_k(1 - x_{ijk}), \quad (10)$$

$$\forall i \in V, j \in V, i \neq j, k \in K;$$

$$0 \leq u_{Ok}^1 \leq U_k, \forall k \in K; \quad (11)$$

$$0 \leq q_{jk}^1 \leq q_{ik}^2 + w_{imk} F_{imk} - h d_{ijk} x_{ijk} + Q_k(1 - x_{ijk}), \quad (12)$$

$$\forall i \in O \cup N, j \in N, i \neq j, m \in P, k \in K;$$

$$0 \leq q_{ik}^1 \leq Q_k, \forall i \in V, k \in K; \quad (13)$$

$$0 \leq q_{ik}^2 + w_{ijk} F_{ijk} \leq Q_k, \forall i \in V, j \in P, k \in K; \quad (14)$$

$$q_{ik}^1 = q_{ik}^2, \forall i \in N, k \in K; \quad (15)$$

$$t w_{ik} = \max \{(e_i - t_{ik}^1), 0\}, \forall i \in N, k \in K; \quad (16)$$

$$t_{ik}^2 = t_{ik}^1 + t w_{ik} + t s_{ik} + t c_{ik}, \forall i \in N \cup P, k \in K; \quad (17)$$

$$t_{ijk} = \frac{d_{ijk}}{v}, \forall i, j \in V, k \in K; \quad (18)$$

$$t_{jk}^1 = \sum_{i \in V, i \neq j} x_{ijk} (t_{ik}^2 + t_{ijk}), \forall j \in V, k \in K; \quad (19)$$

$$t c_{ik} = \frac{w_{jik} F_{jik}}{g}, \forall i \in P, j \in V, k \in K; \quad (20)$$

$$u_{ik}^2 = u_{lk}^1, \forall i, l \in V, k \in K; \quad (21)$$

$$u_{lk}^2 = u_{mk}^1, \forall l, m \in V, k \in K; \quad (22)$$

$$w_{ijk} = \begin{cases} 1, & r_{ijk} - q_{jk}^1 > 0; \\ 0, & r_{ijk} - q_{jk}^1 \leq 0; \end{cases} \quad (23)$$

$$\forall i \in N \cap V_k, j \in P, k \in K;$$

$$x_{ijk}, y_{ik}, w_{ijk}, z_{ir}^k \in \{0, 1\}, \quad (24)$$

$$\forall i \in V, j \in P, k \in K, r \in M_i.$$

目标函数(4)旨在最小化总成本,涵盖车辆固定成本、行驶成本、充电成本及时间窗惩罚成本(含早到和晚到).式(5)约束了每辆车至多被分配一条配送路线;式(6)确保使用的车辆数不超过物流企业拥有的车辆总数;式(7)表示车辆进出节点的次数平衡;式(8)确保所有客户节点的需求得到满足,拆分后每个订单的需求量之和等于该客户节点的总需求;式(9)限制了车辆的装载能力上限;式(10)表示车辆到达某节点时的载重量约束;式(11)表示车辆在配送中心时的可装载量约束;式(12)表示车辆从一节点

行驶到另一节点的电量约束;式(13)表示车辆到达任一节点时的电量非负;式(14)表示车辆在充电站点的可充电量关系;式(15)表示车辆在客户节点装卸时电量消耗忽略不计;式(16)量化了车辆早于客户指定左时间窗达到时所需额外等待时间;式(17)构建了车辆离/到某节点的时间函数关系;式(18)表示车辆在两节点间的行驶时间;式(19)构建了车辆到达一节点与其驶离另一节点的时间函数关系;式(20)表示车辆在充电站点的充电时间;式(21)和(22)限定了车辆访问的客户节点顺序为*i, l, m*;式(23)表示车辆驶离节点*i*后是否前往充电站*j*处充电的决策;式(24)为决策变量约束.

2 算法设计

电动汽车充电策略和路径优化问题,作为EVRP问题的一种变体,是典型的NP-hard问题^[20].在处理大规模算例时,精确算法的求解效率急剧下降,往往无法在合理时间限制内找到其最优解.与常规的EVRP问题相比,本文考虑需求可离散拆分的情况,这使得求解问题更为复杂,约束条件也更多,对算法的求解能力提出了更高要求.因此,本文采用改进的遗传-模拟退火算法进行求解.该算法在交叉和变异操作上进行了改进,使得算法能够更好地表达问题空间中的解,从而更有效地搜索优化解.具体而言,首先利用遗传算法生成初始解,然后利用模拟退火算法对初始解进行优化,既保留了遗传算法的全局搜索能力,又具备模拟退火算法的局部寻优能力.算法流程见图2.

2.1 编码设计

针对本文问题的特性,采用自然数编码方式,每条染色体上的自然数依次代表配送中心、客户节点及充电站.其中:配送中心编码为0;客户节点依次编码为1~*n*;充电站编码为*n+1*~*n+m*.如2辆车服务8个客户节点并途径2个充电站的场景,染色体编码0-3-5-10-8-0-4-2-9-1-7-6-0中,前半段0-3-5-10-8-0为第1辆电动车的路径规划,该车自配送中心出发,服务客户节点3、5,至充电站10后服务完客户节点8后返回.

2.2 种群的初始化

初始种群的优质性是算法求解性能的关键因素之一,为快速获取高质量解,本文参考文献[5]采用扫描算子优化初始种群的构建,步骤如下.

step 1: 采集配送中心*O*的坐标(x_0, y_0)以及*n*个客户节点的坐标(x_i, y_i).

Step 2: 以配送中心为原点建立极坐标系.利用

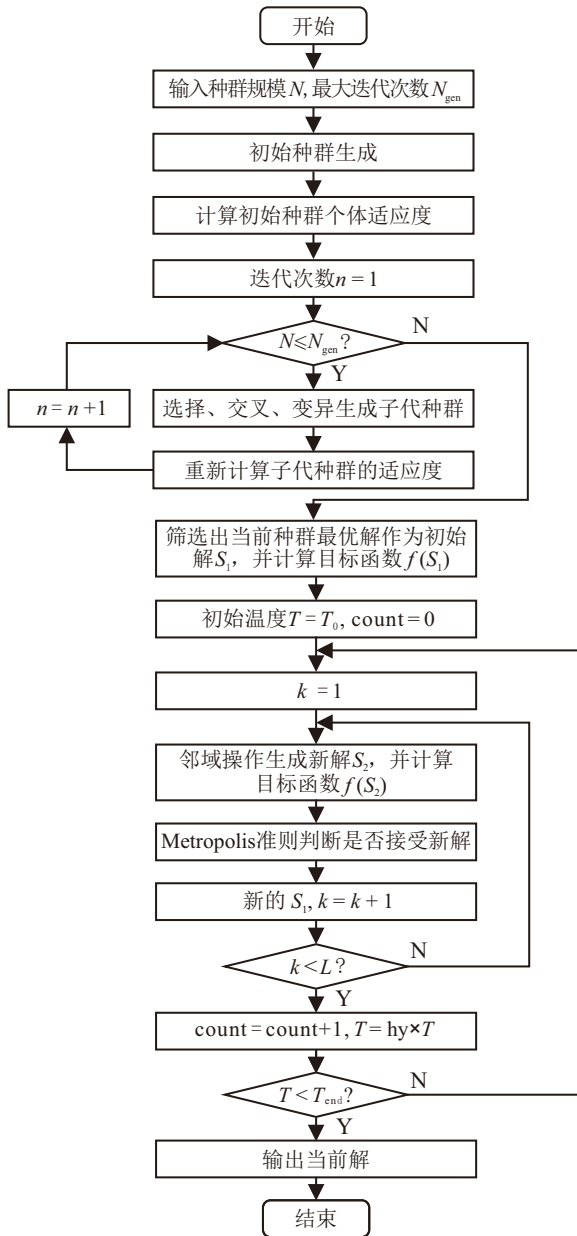


图2 算法流程

公式 $R = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$ 以及三角函数 $\cos \theta_i = x_i/R$ 和 $\sin \theta_i = y_i/R$, 计算每个客户节点与 X 轴夹角的数值 θ_i , 汇总这些夹角值形成集合 $G = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$.

step 3: 降序排列集合 G 中的元素, 据此构建一条从配送中心出发, 依次遍历选定客户节点, 并最终可能返回配送中心的初始染色体.

step 4: 运用 $\text{unidrnd}(N)$ 这一函数随机生成一个位于 $[0, n]$ 之间的自然数, 据此在染色体中定位并截取片段, 调换该片段位置, 生成新的染色体.

step 5: 在新染色体的基础上执行分配车辆与插入充电站的操作, 确保其满足配送需求和充电约束, 生成可行的染色体.

step 6: 重复执行 step 4 和 step 5, 直达到达所需

数量的初始种群规模.

2.3 适应度函数

针对本文的问题, 将目标函数最小值 Z 的倒数设定为适应度函数, 为 $\text{fit}(i) = 1/\min Z$.

2.4 遗传操作

1) 选择操作: 为获得质量较高的子代染色体, 需挑选出优质的父代染色体, 父代染色体的质量由其适应度值决定. 依据适应度值的大小, 采用保留最优个体与轮盘赌策略相结合的方式选择父代染色体.

2) 交叉操作: 对于初始种群中的个体, 由于嵌入了充电站点的基因编码, 直接进行交叉操作可能产生不合理的充电站点选择, 进而无法满足后续配送的电量需求, 导致生成劣解. 因此, 在执行交叉操作之前, 首要步骤是预处理父代染色体, 即移除充电站位置基因片段. 随后, 采用局部映射交叉策略, 精心筛选并随机配对表现优异的父代染色体, 进行高效的成对交叉. 交叉后, 依序计算每条染色体中电动汽车到达每个客户节点后完成剩余任务所需的电量. 若所需电量超出当前电量, 则在该客户点后插入最近充电站的编码. 具体过程如图 3 所示.

3) 变异操作: 首先, 根据预设的变异概率, 确定需要进行变异操作的父代染色体. 与交叉操作相似, 变异操作之前也需要先删除充电站基因编码; 其次, 在区间 $[1, n]$ 内随机生成两个不重复的自然数, 作为染色体上待交换基因的位置索引; 然后, 交换这两个位置上的基因编码信息; 最后, 参照交叉操作的方法, 将充电站基因编码重新插入到染色体中.

通过上述遗传算法的操作步骤, 可以不断迭代以获取种群的可行解. 当迭代次数达到预设的最大值 N_{gen} 时, 算法停止迭代, 筛选出当前种群中的最优解作为后续模拟退火算法的初始解 S_1 .

2.5 模拟退火操作

1) 邻域操作. 通过执行邻域操作对初始解进行变换, 具体操作是随机选取染色体上的两个不同位置, 并逆转这两个位置之间的编码序列, 从而生成一条新的染色体作为新解 S_2 .

2) Metropolis 准则. 用于判断是否采纳新解 S_2 , 设当前温度为 T , 初始解 S_1 的成本为 $Z(S_1)$, 新解 S_2 的成本为 $Z(S_2)$, 成本差为 $\Delta Z = Z(S_2) - Z(S_1)$. 如果 $\Delta Z < 0$, 则以概率 1 接受新解; 否则, 以概率 $\exp(-\Delta Z/T)$ 接受新解. 迭代 L 次 (内循环), 记录当前温度下的最优解为 S_1 .

3) 降温操作与迭代终止. 设定初始温度为 T_0 , 终止温度为 T_{end} . 利用降温速率 hy ($0 < \text{hy} < 1$) 进行降

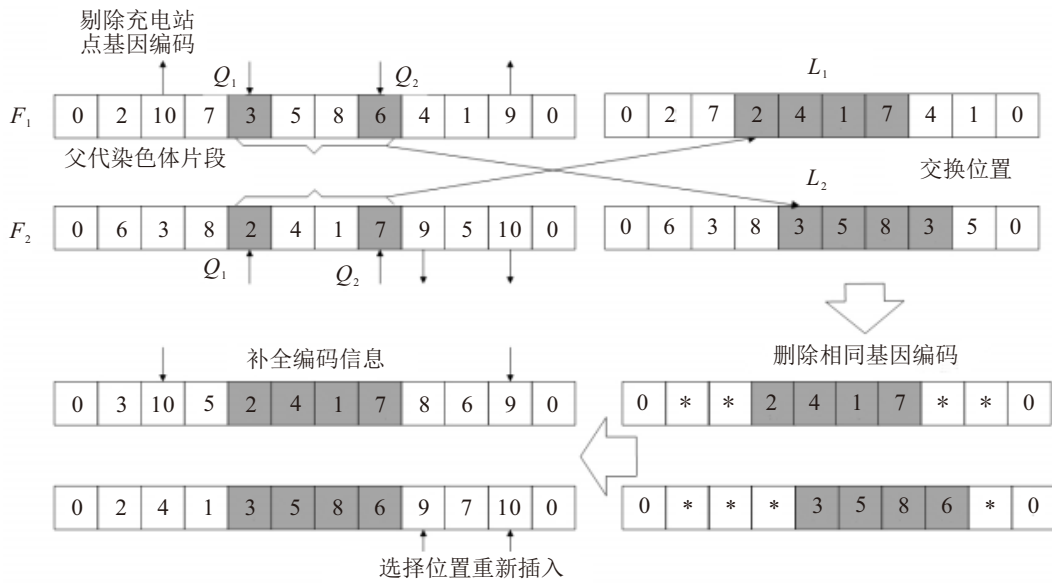


图3 交叉操作

温,即可得到外循环的迭代次数.在每次的迭代过程中,首先计算新的温度 $T = \text{hy} \times T$,然后执行邻域操作和 Metropolis 准则来更新当前温度下的最优解.如果当前温度下的最优解优于上一个温度下的最优解,则更新记录;否则,保持上一温度下的最优解.如果 $T \geq T_{\text{end}}$,则继续迭代;否则,停止迭代,并输出当前记录的最优解作为算法的最终结果.

3 算例分析

3.1 小规模算例

本节从 Solomon 算例库 R101 中选取部分节点,构建 4 组客户节点数分别为 6、8、12、16 的小规模算例.每个算例中设有 2 个充电站,各客户节点均有 2 个订单.配送采用两种型号的电动汽车,其装载量上限分别为 1 t 和 1.5 t,电量上限分别为 130 kWh 和 160 kWh,最大行驶距离分别为 130 km 和 160 km,电池消耗系数均为 1 kWh/km,平均行驶速度均为 40 km/h.成本方面,两种型号电动汽车固定成本单价分别为 600 元和 800 元,每公里的行驶成本分别为 8 元和 10 元;每小时的充电费用为 50 元,左、右时间窗的单位惩罚成本分别为 10 元/h 和 20 元/h.算法参数方面,遗传算法包括:初始的种群规模 200,交叉概率 0.9,变异概率 0.05,迭代次数 500;模拟退

火算法包括:初始温度 100,终止温度 0.01,降温速率 0.99,迭代次数为 200.通过 CPLEX 和本文算法对 4 组算例进行求解,结果如表 1 所示.

由表 1 可见,本文算法在计算算例 $p-6$ 和 $p-8$ 时,其优化解与 CPLEX 计算结果完全一致.在计算算例 $p-12$ 和 $p-16$ 时,尽管本文算法优化解略高于 CPLEX,但是差异微小,不超过 0.52%.同时,本文算法的运行时间显著少于 CPLEX,从而表明了其有效性.

3.2 大规模算例

为了验证算法的适用性,构建一个大规模算例.该算例以电动汽车为运载手段,服务于特定区域内散布的 32 位客户,并在该区域内设有 5 个充电站.算例中选择与小规模算例相同的两类电动汽车,每种类型的最大车辆数限制为 8 辆.对于节点的标号:0 代表配送中心,1~32 代表客户节点,33~37 代表充电站.各客户节点的位置坐标 (x_i, y_i) 以平面直角坐标系表示,单位为 km;时间窗表示为 $[e_i, l_i]$,服务时间为 $t_{s,ik}$,时间单位均为 h.此外,各客户节点的需求量已知且被随机分解为 1~3 个订单不等,详细的节点相关信息如表 2 所示.

3.3 运算结果分析

基于上述算例数据,本文对部分充电策略以及

表1 不同客户节点数量下的算法性能对比

算例	CPLEX				本文算法				
	最优解/元	距离成本/元	惩罚成本/元	t/s	优化解/元	距离成本/元	惩罚成本/元	t/s	Gap/%
$p-6$	537.45	322.08	75.37	24.26	537.45	322.08	75.37	3.25	0
$p-8$	606.58	368.35	86.25	121.48	606.58	368.35	86.25	3.86	0
$p-12$	736.26	455.36	104.37	459.64	738.69	456.86	105.76	5.23	0.33
$p-16$	906.54	543.82	144.37	1644.26	953.76	557.36	148.62	6.59	0.52

表2 节点相关信息

节点编号	x_i	y_i	e_i	l_i	ts_{ik}	p_i^1	p_i^2	p_i^3
0	40	40	0	—	0	—	—	—
1	46	54	189	204	0.2	0.06	0.14	0
2	40	22	178	202	0.3	0.18	0.08	0
3	30	35	99	109	0.3	0.17	0.06	0
4	13	52	95	105	0.3	0.12	0.05	0
5	60	65	97	107	0.3	0.26	0.04	0.12
6	35	65	124	134	0.3	0.19	0.11	0
7	25	70	67	77	0.5	0.14	0.09	0
8	55	22	168	205	0.3	0.21	0	0.06
9	20	15	145	187	0.3	0.15	0	0.12
10	15	25	163	190	0.3	0.16	0.08	0
11	10	35	157	167	0.3	0.32	0.16	0.08
12	25	45	179	204	0.4	0.25	0.04	0
13	20	65	165	187	0.5	0.12	0.07	0
14	50	35	176	208	0.4	0.16	0.15	0.3
15	46	42	165	213	0.3	0.21	0.5	0
16	65	47	158	190	0.4	0.12	0.05	0.07
17	36	57	145	202	0.4	0.16	0.5	0
18	40	74	156	186	0.3	0	0.2	0.08
19	50	64	37	47	0.5	0.15	0.04	0
20	67	72	143	153	0.5	0.18	0	0.5
21	5	65	41	51	0.6	0.17	0.13	0
22	25	25	178	198	0.5	0.11	0.08	0
23	10	10	83	93	0.4	0.16	0.04	0.06
24	65	17	44	54	0.3	0.1	0	0.04
25	52	6	97	107	0.5	0.08	0.14	0
26	29	17	31	41	0.2	0.08	0	0.14
27	28	8	167	185	0.5	0.04	0.09	0
28	17	38	32	42	0.3	0.04	0.14	0
29	62	27	155	184	0.4	0.18	0.21	0.1
30	18	57	148	192	0.6	0	0.05	0
31	11	73	108	118	0.7	0	0	0.1
32	54	54	165	203	0.4	0	0	0.16
33	16	19	0	—	0	—	—	—
34	25	60	0	—	0	—	—	—
35	35	10	0	—	0	—	—	—
36	45	30	0	—	0	—	—	—
37	60	52	0	—	0	—	—	—

完全充电策略下的配送路径进行对比分析. 通过运用 Matlab R2020b 的编程平台, 实现第 2 部分设计的算法, 得到优化结果. 其中: 两种策略下的配送路径及充电情况如图 4 和表 3 所示, 多车型充电率及成本情况如表 4 所示.

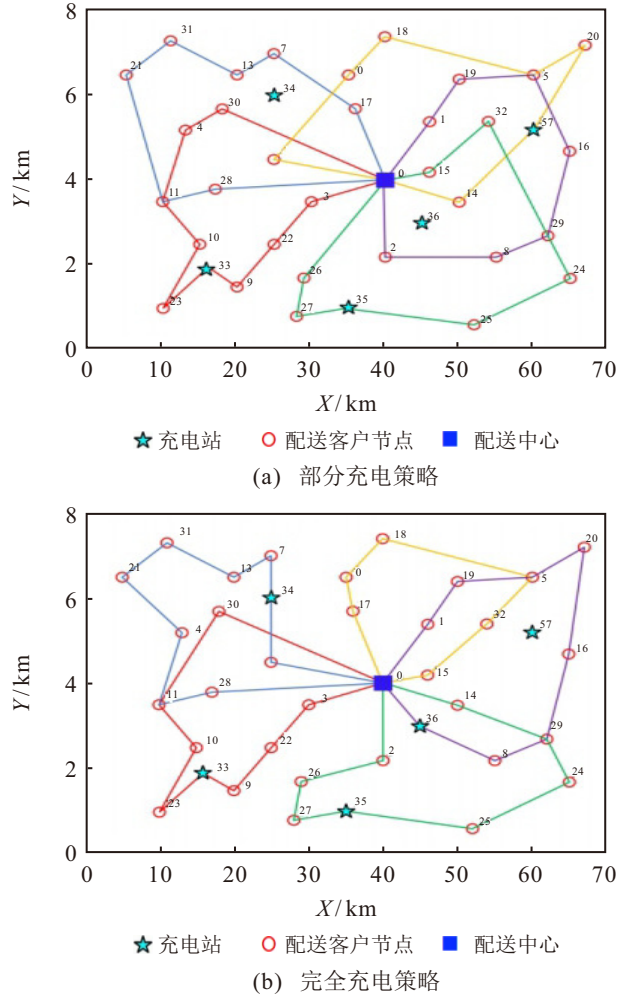


图4 两种充电策略下多车型的配送路径

由图 4 和表 3 可见, 受客户节点服务时间窗的约束, 两种充电策略下的配送路径大体相似, 且所需车辆数保持一致. 然而, 在充电站点的选择上有所区

表3 两种充电策略下的多车型配送路径及充电情况

充电策略	车型	车辆	配送路径	需求拆分配送客户点	充电位置
部分充电	C1	1	0→3→22→9→33→23→10→11→30→0	11	33
		2	0→17→6→18→5→32→15→0	5	—
	C2	3	0→28→11→4→21→31→13→7→34→12→0	11	37
		4	0→1→19→5→20→16→29→8→36→0	5 29	36
		5	0→14→29→24→25→35→27→26→2→0	29	35
完全充电	C1	1	0→3→22→9→33→23→10→11→4→30→0	11	33
		2	0→12→6→18→5→20→37→14→0	5	37
	C2	3	0→28→11→21→31→13→7→17→0	11	—
		4	0→1→19→5→16→29→8→2→0	5 29	—
		5	0→15→32→29→24→25→35→27→26→0	29	35

表4 两种充电策略下的多车型充电率及成本情况

充电策略	车型	车辆	充电率/%	路径行驶成本/元	充电成本/元	惩罚成本/元	总成本/元
部分充电	C1	1	25	828.20	54.27	314.08	2 091.18
		2	—				
	C2	3	33.3				
		4	43.9				
		5	40.3				
完全充电	C1	1	100	981.37	67.69	356.70	2 310.15
		2	100				
	C2	3	—				
		4	—				
		5	100				

别.值得注意的是,客户节点 5、11、29 的订单需求量较大,因此进行了拆分配送,以确保时效性.而其他客户节点的需求量较小,车辆仅需一次配送即可满足其需求.

由表 4 可见,在实施部分充电策略下,配送车辆 1、3、4、5 的充电率效率分别达到了 25%、33.3%、43.9% 和 40.3%.与完全充电策略相比,这种策略不仅大幅度减少了配送车辆的充电时间,而且有效避免了车辆剩余电量的浪费.在成本方面,部分充电策略下的路径行驶成本(828.20 元)、充电成本(54.27 元)及惩罚成本(314.08 元)均低于完全充电策略下的相应成本,总成本减少了 218.97 元,进一步凸显了部分充电策略的经济效益优势.

3.4 敏感性分析

客户对配送时效性有明确要求,任何超出规定时间窗的延误都将使物流公司面临时间惩罚成本,并直接影响客户满意度.鉴于电动汽车在充电站可能遇到排队等待的情况,充电服务时间成为了影响配送效率的重要因素.为此,针对两种充电策略,对充电站服务时间进行敏感性分析.在保持其他条件不变的前提下,设定 4 种不同的服务时长(0.3 h, 0.6 h, 0.9 h, 1.2 h),并计算相应的时间窗惩罚成本,结果如图 5 所示.

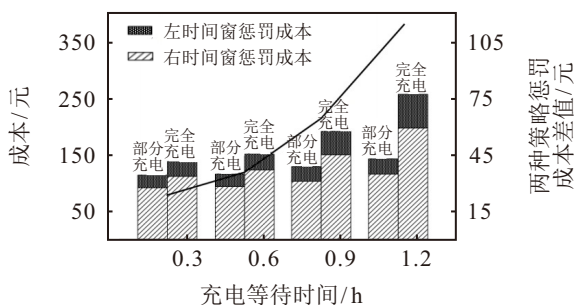


图5 两种充电策略惩罚成本对比

由图 5 可见,随着电动汽车充电等待时间的增加,无论是部分充电策略还是完全充电策略,均会导

致时间窗惩罚成本的增加.然而,部分充电模式在缓解时间窗惩罚成本增长方面展现出明显优势,相较于全面充电策略,其成本增幅更为平缓.这进一步印证了,在面临严格的服务时间窗约束时,部分充电策略能够更有效地平衡充电需求与配送时效性,且随着充电等待时间的延长,这种优势变得更加明显.因此,从优化成本和提高服务效率的角度看,部分充电策略是一个更为合理的选择.

4 结论

本文以电动汽车的配送问题为研究对象,在考虑客户需求可离散拆分的基础上,构建了一个多车型充电策略和路径优化模型,该模型旨在最小化电动汽车的固定成本、路径行驶成本、充电成本和时间窗惩罚成本.为求解这一复杂模型,设计一种改进的遗传-模拟退火算法,并通过算例分析验证模型与算法的有效性和适用性.研究表明:1)改进的遗传-模拟退火算法在实际应用中展现了卓越的性能,相较于传统的方法,能够在较短的时间内优化出电动汽车的充电策略和配送路径,显著提高了时间效率.2)在订单可离散分解的物流配送场景下,部分充电策略相较于完全充电策略展现出了显著的优势.具体而言,部分充电策略不仅仅减少了充电时长,而且显著降低了时间窗惩罚成本,为物流配送的灵活性与经济性提供了新的解决方案.3)此外,随着充电等待时间的增加,两种充电策略在时间窗惩罚成本上均呈现出上升趋势.然而,部分充电策略的时间窗惩罚成本增长速度明显低于完全充电策略,特别是在充电等待时间较长的情况下,这一差异更加显著,进一步凸显了部分充电策略在实际应用中的优越性.

参考文献 (References)

[1] 郭戈,张振琳. 电动车辆路径优化研究与进展[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1729-1739.
(Guo G, Zhang Z L. Status and development of electric vehicle routing optimization[J]. Control and Decision,

- 2018, 33(10): 1729-1739.)
- [2] Qin H, Su X X, Ren T, et al. A review on the electric vehicle routing problems: Variants and algorithms[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2021, 8(3): 370-389.
- [3] Schiffer M, Klein P S, Laporte G, et al. Integrated planning for electric commercial vehicle fleets: A case study for retail mid-haul logistics networks[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 291(3): 944-960.
- [4] 程坦, 陈鹏, 张国伟, 等. 部分充电策略下的多车型电动汽车车辆路径优化问题研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2022, 20(2): 105-114.
(Cheng T, Chen P, Zhang G W, et al. Heterogeneous electric vehicles routing problem under partial charging strategy[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2022, 20(2): 105-114.)
- [5] 葛显龙, 李祖伟, 葛小波. 考虑灵活充电策略的带时间窗物流配送路径优化研究[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(6): 1293-1301.
(Ge X L, Li Z W, Ge X B. Research on logistics distribution route optimization with time window considering flexible charging strategy[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(6): 1293-1301.)
- [6] Raesi R, Zografos K G. Coordinated routing of electric commercial vehicles with intra-route recharging and en-route battery swapping[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 301(1): 82-109.
- [7] 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 of electric vehicle considering differentiated demand[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(3): 795-803.)
- [8] 王伟权, 丁鼎, 颜林莎. 线性充电策略下多车型电动车辆路径模型研究[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(3): 614-623.
(Wang W Q, Ding D, Yan L S. Path-based model for the heterogeneous-fleet electric vehicle routing problem with partial linear recharging[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(3): 614-623.)
- [9] 吴廷映, 孙灏. 考虑载重影响耗电率的电动车辆路径问题[J]. *控制与决策*, 2023, 38(2): 483-491.
(Wu T Y, Sun H. Electric vehicle routing problem with time window and linear weight-related discharging[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(2): 483-491.)
- [10] Guo G, Kang M. Rebalancing and charging scheduling with price incentives for car sharing systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 18592-18602.
- [11] Guo G, Xu T. Vehicle rebalancing with charging scheduling in one-way car-sharing systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(5): 4342-4351.
- [12] Guo G, Sun T Y. Selective multi-grade charging scheduling and rebalancing for one-way car-sharing systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(4): 4391-4402.
- [13] Guo G, Kang M, Sun T Y. Vehicle/employee rebalancing and charging scheduling in one-way car sharing systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(10): 10665-10675.
- [14] 范厚明, 任晓雪, 刘浩. 带时间窗偏好的同时配集货且需求可拆分车辆路径问题[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(11): 65-71.
(Fan H M, Ren X X, Liu H. Split delivery vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up and time windows preference[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(11): 65-71.)
- [15] Guo F, Huang Z H, Huang W L. Heuristic approaches for a vehicle routing problem with an incompatible loading constraint and splitting deliveries by order[J]. *Computers & Operations Research*, 2021, 134: 105379.
- [16] Ferreira K M, de Queiroz T A, Munari P, et al. A variable neighborhood search for the green vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints and split delivery[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 316(2): 597-616.
- [17] 符卓, 刘文, 邱萌. 带软时间窗的需求依订单拆分车辆路径问题及其禁忌搜索算法[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(5): 78-86.
(Fu Z, Liu W, Qiu M. A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with soft time windows and split deliveries by order[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(5): 78-86.)
- [18] 揭婉晨, 侍颖, 杨珺, 等. 需求可拆分电动汽车车辆路径问题及其改进分支定价算法研究[J]. *管理学报*, 2020, 17(12): 1873-1880.
(Jie W C, Shi Y, Yang J, et al. Split delivery routing problem of electric vehicles and its modified branch-and-price algorithm[J]. *Chinese Journal of Management*, 2020, 17(12): 1873-1880.)
- [19] Huang J H, Liu F X. Charging strategy and routing optimization of electric vehicles under dynamic load[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(11): 3909-3921.
- [20] 刘长石, 陈慧璇, 吴张. 城市物流配送的混合车辆路径规划模型与优化算法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 759-768.
(Liu C S, Chen H X, Wu Z. Programming model and optimization algorithm for the mixed fleet vehicle routing problem in urban logistics distribution[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(3): 759-768.)

作者简介

邢玉伟 (1990-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为物流系统规划与管理, E-mail: xingyuwei1990@dlnu.edu.cn;

王展华 (1998-), 男, 硕士生, 主要研究方向为物流配送优化, E-mail: wangzhanhua1998@163.com;

杨华龙 (1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为物流与供应链管理, E-mail: hlyang@dlnu.edu.cn.