

# 基于能耗、碳排放油电车辆混合最优配置策略

李军涛<sup>1,2</sup>, 茆俊亚<sup>2</sup>, 侯星星<sup>2</sup>, 郭文文<sup>3</sup>

(1.上海海洋大学经济与管理学院, 上海 201306; 2.上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 3.上海海事大学交通运输学院, 上海 201306)

**摘要:**针对混合车队车辆路径优化问题,考虑电动车多次充电、油电混合车队配置比例及车辆装载量对能耗的影响,以包含油耗成本或电动车能耗成本在内的总成本为目标构建数学模型,提出一种改进的遗传-变邻域模拟退火算法,通过实例验证算法的可行性和准确性。仿真试验表明,与全电动车配送方案相比,油电混合模式的配送成本降低25.8%,时间窗惩罚成本降低91.2%;与全燃油车配送方案相比,油电混合模式的碳排放降低62.2%。针对混合车队路径优化问题模型,相对于传统遗传算法,遗传-变邻域模拟退火算法可以更快求得最优解,验证了算法的有效性。根据油电混合车队配置比例对模型的影响分析可知,最优配置比为1:1时,可以获取最优解。

**关键词:**混合车队;能耗;碳排放;遗传-变邻域模拟退火算法;油电混合配置策略

**中图分类号:**TP301 **文献标志码:**A

**引用格式:**李军涛,茆俊亚,侯星星,等.基于能耗、碳排放油电车辆混合最优配置策略[J].山东大学学报(工学版),2025,55(1):15-23.

LI Juntao, MAO Junya, HOU Xingxing, et al. Optimal allocation strategy for fuel-electric vehicles based on energy consumption and carbon emissions[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(1):15-23.

## Optimal allocation strategy for fuel-electric vehicles based on energy consumption and carbon emissions

LI Juntao<sup>1,2</sup>, MAO Junya<sup>2</sup>, HOU Xingxing<sup>2</sup>, GUO Wenwen<sup>3</sup>

(1. College of Economics and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. College of Transport & Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** For the vehicle route optimization problem of mixed fleet, considering the impact of multiple charging sessions for electric vehicles, the configuration ratio of mixed fleet, and vehicle loading on energy consumption, a total cost including fuel consumption cost or electric vehicle energy consumption cost was constructed as a mathematical model, an improved genetic-variable neighborhood simulated annealing algorithm was proposed, and the feasibility and accuracy of the algorithm were verified through examples. The simulation experiments showed that the mixed fleet mode reduced the transportation cost by 25.8% and the time window penalty cost by 91.2% compared with the all-electric vehicle distribution scheme and reduced the carbon emission by 62.2% compared with the all-fuel vehicle distribution scheme. Aiming at the mixed fleet path optimization problem model, compared with the traditional genetic algorithm, the genetic-variable neighborhood simulated annealing algorithm could obtain the optimal solution faster, verifying the effectiveness of the algorithm. According to the analysis of the impact of the mixed fleet allocation ratio on the model, the optimal solution could be obtained when the optimal allocation ratio is 1:1.

**Keywords:** mixed fleet; energy consumption; carbon emission; genetic-variable neighborhood simulated annealing algorithm; mixed fleet configuration strategy

## 0 引言

在多样化的物流配送问题中,车辆路径问题一

直是最基本的问题。传统配送业务多以燃油车为基础,车辆运输过程中燃油消耗带来的碳排放问题是政府着重管控的对象。因此,在研究车辆路径问题时,越来越多的人开始关注其对环境的潜在影

响<sup>[1]</sup>。目前,电动车由于低能耗、低污染和低成本的特点,在物流行业得到广泛应用。文献[2]研究电动车的多种充电技术,验证了快速充电在车队运营中的优势;文献[3]在考虑车辆装载约束和线性充电模式的情况下,以最短行驶里程为优化目标,研究带时间窗的电动车路径优化问题;文献[4]在电动车中引入部分充电策略,采用改进的混合模拟退火算法求解以总成本最小化为目标的数学模型,验证了部分充电策略可以提高电池利用率,降低企业配送成本;文献[5]构建纯电动车在城市配送的车辆路径问题,考虑时变路网和驾驶员驾驶风格对电动车电池消耗的影响,通过蚁群算法求解,研究表明忽略真实交通环境的静态配送方案可能增加总配送成本。虽然电动车提供了与可持续性相关的潜在效益,但存在一些限制,例如高昂的购买价格和电池成本、有限的行驶里程及较长的充电时间。因此,在电动车电池技术实现重大突破或降低电动车的造价成本之前,电动车和燃油车的混合车队配送仍是目前的主流模式。文献[6]提出两梯队车辆路径问题,燃油车服务于第一梯队,电动车在第二梯队运行;文献[7]也解决了两梯队车辆路径问题,主要区别在于电动车采取更换电池的策略,通过敏感性分析探讨电池续航里程与车辆减排效果之间的相互作用;文献[8]对比燃油车与电动车的开放式选址路径问题,证明在忽略车辆前期购置等成本的前提下,电动车配送更具有优势;文献[9]提出具有部分充电和时间窗的绿色混合车队车辆路径问题,涉及运营车队的碳排放限制;文献[10]将部分充电策略应用于混合车队硬时间窗路径问题中,设计一种启发式算法求解,研究表明距离及考虑加速和减速的模型会对能耗产生影响;文献[11]针对混合时间窗下多中心混合车队车辆路径优化问题,构建燃油车和电动车能耗模型,采用更换电池模式并基于运力平衡返回策略,设计遗传-大邻域混合算法进行求解,验证运力平衡返回策略能够有效降低企业配送成本;文献[12]针对现实能耗和部分充电条件下的绿色混合车队车辆路径问题,建立一个混合整数规划模型,采用自适应大邻域搜索算法求解,对充电站的最优选址进行动态规划,验证算法在求解中大型模型下的高效性。

已有成果为深入研究混合车队路径问题奠定了良好基础,但仍存在以下研究缺口:(1)已有研究大多假定配送成本只与车辆行驶距离相关,与城市混合车队配送的实际情况不够吻合。混合车队的配送成本不仅包含车辆使用的固定成本,还包含电

动车在配送途中的充电成本、电动车的能耗、燃油车的油耗与碳排放费用等成本,应予以综合考虑。(2)电动车在配送过程中只允许充电一次,限定了车辆的行驶距离。因此,本研究综合考虑混合车队、多次充电等因素,构建基于能耗和碳排放的混合车队路径问题(mixed fleet vehicle routing problem with energy consumption and carbon emission, MFVRPECCE),提出一种遗传-变邻域模拟退火算法求解该问题,为物流配送提供决策参考。

## 1 问题描述和策略分析

### 1.1 问题描述及假设

本研究对混合车队车辆路径优化问题描述如下。假设某公司拥有1个配送中心和1支电动车及燃油车混合的车队,设 $V$ 为所有客户节点集合, $V = \{1, \dots, N\}$ ,其中 $N$ 为正整数; $G$ 为配送中心集合, $G = \{0, N+1\}$ ,2个节点位置相同,每辆车都从节点0出发,完成其所有服务后返回节点 $N+1$ ; $F'$ 为所有充电站节点集合 $F$ 和充电站虚拟节点的集合,允许对某个充电站进行多次访问<sup>[13]</sup>; $V_0$ 为客户节点和配送中心节点0的集合, $V_0 = V \cup \{0\}$ ; $V_{N+1}$ 为客户节点和配送中心节点 $N+1$ 的集合, $V_{N+1} = V \cup \{N+1\}$ ; $V'$ 为客户节点和充电站节点的集合, $V' = V \cup F'$ ; $V'_0$ 为客户节点、充电站节点及配送中心节点0的集合, $V'_0 = V \cup F' \cup \{0\}$ ; $V'_{N+1}$ 为客户节点、充电站节点及配送中心节点 $N+1$ 的集合, $V'_{N+1} = V \cup F' \cup \{N+1\}$ 。

为了更好地界定所研究问题,假设条件如下:只有1个配送中心且能满足全部需求;车辆从配送中心出发,完成配送后驶回;每个客户只接受1次服务;电动车从配送中心出发时满电,若电量不足无法完成后续配送时,优先选择最近的充电站进行充电(假设电动车的充电模式仅限于满充,并且1个充电站可以被多辆电动车同时使用);燃油车在行驶过程中会产生油耗和碳排放,但在服务客户点时不会产生。

### 1.2 能耗分析

#### 1.2.1 电动车的能耗成本

为了获取电动车(electric vehicle, EV)的能耗,需要引入总牵引功率 $P_M$ 。采用文献[14]提出的能耗模型评估 $P_M$ ,计算式为

$$P_M = (ma + 0.5C_d \rho A v^2 + mg \sin \alpha + mgf \cos \alpha)v, \quad (1)$$

式中: $m$ 为整车质量; $a$ 为加速度; $C_d$ 为空气阻力系数; $\rho$ 为空气密度,一般取 $\rho = 1.225 \text{ 8 kg/m}^3$ ; $A$ 为车辆迎风面积; $v$ 为车速; $g$ 为重力加速度; $\alpha$ 为路面倾

斜角; $f$ 为滚动阻力常数。

车辆总质量

$$m_q = m_0 + m_{ij}^k, \quad (2)$$

式中, $m_0$ 为车辆整备质量, $m_{ij}^k$ 为车辆 $k$ 从节点 $i$ 到节点 $j$ 装载的货物质量。本研究假定车辆是匀速行驶,则质量为 $m_q$ 的电动车从节点 $i$ 到节点 $j$ 的恒定功率

$$P_{ij}^k = (0.5C_d \rho A v^2 + m_q g \sin \alpha + m_q g f \cos \alpha) v_{ij}, \quad (3)$$

式中 $v_{ij}$ 为节点 $i$ 到节点 $j$ 的行驶速度。综上所述,可以计算得到电动车从节点 $i$ 到节点 $j$ 的耗电量

$$E_{ij}^k = P_{ij}^k t_{ij} \eta_a \eta_b, \quad (4)$$

式中, $t_{ij}$ 为节点 $i$ 到节点 $j$ 的行驶时间, $\eta_a$ 为机械效率, $\eta_b$ 为能源放电效率。电动车的能耗成本

$$F_1 = Z_1 \sum_{k \in K_E} \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_{N+1}} E_{ij}^k x_{ijk}^E, \quad (5)$$

式中: $Z_1$ 为电池单位电量成本,单位元/(kWh); $K_E$ 为EV集合; $x_{ijk}^E$ 为0-1变量,当第 $k$ 辆电动车从节点 $i$ 到节点 $j$ 进行配送时, $x_{ijk}^E = 1$ ,否则, $x_{ijk}^E = 0$ 。

### 1.2.2 燃油车的能耗成本

燃油车(internal combustion vehicle, ICV)从节点 $i$ 行驶到节点 $j$ 时的燃料消耗率

$$R_{ij}^k = \frac{\xi}{\kappa \psi} \left( \mu N_s D + \frac{P_{ij}^k}{\eta \cdot \eta_{tr}} \right), \quad (6)$$

式中, $\xi$ 为燃料质量与空气质量的比, $\kappa$ 为柴油热值, $\psi$ 为将燃料速率单位从g/s转换为L/s的系数, $\mu$ 为发动机摩擦因数, $N_s$ 为发动机转速, $D$ 为发动机排量, $\eta$ 为柴油机效率, $\eta_{tr}$ 为传动效率。在获得燃料消耗率后,燃油车的油耗成本

$$F_2 = Z_2 \sum_{k \in K_C} \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_{N+1}} f_{ij}^k x_{ijk}^C, \quad (7)$$

式中: $Z_2$ 为燃油单位成本,单位元/L; $K_C$ 为ICV集合; $f_{ij}^k$ 为从节点 $i$ 行驶到节点 $j$ 的燃料消耗量, $f_{ij}^k = R_{ij}^k t_{ij}$ ; $x_{ijk}^C$ 为0-1变量,当第 $k$ 辆燃油车从节点 $i$ 到节点 $j$ 进行配送时, $x_{ijk}^C = 1$ ,否则, $x_{ijk}^C = 0$ 。

### 1.3 碳排放成本

车辆行驶里程会影响燃油消耗量,燃料消耗量与CO<sub>2</sub>排放量密切相关,因此本研究采用输入-产出模型计算碳排放量<sup>[15]</sup>。总碳排放成本

$$F_3 = C_e C_f \sum_{k \in K_C} \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_{N+1}} x_{ijk}^C f_{ij}^k, \quad (8)$$

式中, $C_e$ 为单位碳排放对环境的损害成本, $C_f$ 为CO<sub>2</sub>排放系数。

### 1.4 时间窗惩罚成本

考虑电动车充电或燃油车都会带来额外的时间消耗,时间惩罚成本函数

$$C(\tau_i) = \begin{cases} a_1(e_i - \tau_i), & \tau_i < e_i \\ 0, & e_i \leq \tau_i \leq l_i \\ a_2(\tau_i - l_i), & l_i < \tau_i \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $\tau_i$ 为车辆到达节点 $i$ 的时间; $e_i$ 为节点 $i$ 的左时间窗; $l_i$ 为节点 $i$ 的右时间窗; $a_1$ 为早到惩罚因数,单位元/min; $a_2$ 为晚到惩罚因数,单位元/min。配送中总时间窗惩罚成本

$$F_4 = \sum_{i=0}^N (a_1 \max\{e_i - \tau_i, 0\} + a_2 \max\{\tau_i - l_i, 0\}). \quad (10)$$

### 1.5 固定成本

车辆固定成本主要由配送人员固定工资、车辆损耗成本和车辆保养成本组成,因此总固定成本

$$F_5 = \sum_{k \in K_C \cup K_E} f_m x_{ijk}, \quad (11)$$

式中: $f_m$ 为不同车辆产生的固定成本,单位元/辆; $x_{ijk}$ 为0-1变量,当车辆 $k$ 从节点 $i$ 到 $j$ 进行配送时, $x_{ijk} = 1$ ,否则, $x_{ijk} = 0$ 。

## 2 模型建立

### 2.1 目标函数

基于以上分析,建立MFVRPECCCE数学模型。目标函数为

$$\min C = \alpha(F_1 + F_2 + F_5) + \beta F_3 + \gamma F_4, \quad (12)$$

式中: $C$ 为成本; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 分别为配送成本权重、碳排放成本权重、惩罚成本权重,由于物流配送中各成本重要性不同,通过专家打分得出本研究权重数据为 $(\alpha, \beta, \gamma) = (0.5, 0.3, 0.2)$ 。

### 2.2 约束条件

(1) 每个客户最多被EV或ICV访问一次,即

$$\sum_{k \in K_E} \sum_{j \in V_{N+1}} x_{ijk}^E + \sum_{k \in K_C} \sum_{j \in V_{N+1}} x_{ijk}^C = 1. \quad (13)$$

(2) 车辆从配送中心出发,首先访问客户,即

$$\begin{cases} \sum_{j \in V_{N+1}} x_{ijk}^E \leq 1, \quad \forall i \in V_0, \quad \forall k \in K_E \\ \sum_{j \in V_{N+1}} x_{ijk}^C \leq 1, \quad \forall i \in V_0, \quad \forall k \in K_C \end{cases}. \quad (14)$$

(3) 到达和离开同一节点的弧的数目相等,即

$$\begin{cases} \sum_{i \in V_0} x_{ijk}^E = \sum_{i \in V_{N+1}} x_{ijk}^E, \quad \forall j \in V', \quad \forall k \in K_E \\ \sum_{i \in V_0} x_{ijk}^C = \sum_{i \in V_{N+1}} x_{ijk}^C, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K_C \end{cases}. \quad (15)$$

(4) 限制服务顾客的EV和ICV的数量,即

$$\begin{cases} \sum_{j \in V'} x_{0jk}^E \leq k_E, \quad \forall k \in K_E \\ \sum_{j \in V} x_{0jk}^C \leq k_C, \quad \forall k \in K_C \end{cases}, \quad (16)$$

式中, $k_E$ 为EV总数, $k_C$ 为ICV总数。

(5) 确保车辆离开配送中心和客户点的时间可行性,即

$$\begin{cases} \tau_i + (t_{ij} + s_i) \left( \sum_{k \in K_E} x_{ijk}^E + \sum_{k \in K_C} x_{ijk}^C \right) - \\ M \left( 1 - \left( \sum_{k \in K_E} x_{ijk}^E + \sum_{k \in K_C} x_{ijk}^C \right) \right) \leq \tau_j, \\ \forall i \in V_0, \forall j \in V, i \neq j \\ \tau_i + (t_{ij} + s_i) \sum_{k \in K_E} x_{ijk}^E - M \left( 1 - \sum_{k \in K_E} x_{ijk}^E \right) \leq \tau_j, \\ \forall i \in V_0, \forall j \in F' \end{cases}, \quad (17)$$

式中,  $\tau_j$  为车辆到达节点  $j$  的时间,  $s_i$  为节点  $i$  的服务时间,  $M$  为一个很大的正数。

(6) 确保车辆离开充电站的时间可行性,即

$$\tau_i + \frac{1}{r} (Y_i^k - y_i^k) + t_{ij} x_{ijk}^E - M(1 - x_{ijk}^E) \leq \tau_j, \quad \forall i \in F', \forall j \in V'_{N+1}, i \neq j, \forall k \in K_E, \quad (18)$$

式中,  $y_i^k$  为 EV 到达充电站的剩余电量,  $Y_i^k$  为 EV 在充电站充电后获得的电量。

(7) 车辆必须在规定的时间窗内访问每个节点,即

$$e_i \leq \tau_i \leq l_i, \forall i \in V \cup \{0\} \cup \{N+1\}. \quad (19)$$

(8) 车辆到达任意节点的载货量都是非负的,即

$$0 \leq m_{ij}^k \leq Q x_{ijk}^E, \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1}, \forall k \in K_E, \quad (20)$$

$$0 \leq m_{ij}^k \leq Q x_{ijk}^C, \forall i \in V_0, \forall j \in V_{N+1}, \forall k \in K_C, \quad (21)$$

式中  $Q$  为车辆容量。

(9) 追踪电动车从节点  $i$  行驶到节点  $j$  的电量,即

$$E_{ij}^k + M(1 - x_{ijk}^E) \leq y_i^k - y_j^k \leq E_{ij}^k - M(1 - x_{ijk}^E), \forall k \in K_E. \quad (22)$$

(10) 规定电动车在充电站执行充电过程时的电量,即

$$E_{ij}^k + M(1 - x_{ijk}^E) \leq Y_i^k - y_i^k \leq E_{ij}^k - M(1 - x_{ijk}^E), \forall k \in K_E. \quad (23)$$

(11) 规定车辆离开客户节点后的电量限制,即

$$\begin{aligned} 0 \leq y_j^k \leq y_i^k - E_{ij}^k x_{ijk} + B(1 - x_{ijk}), \\ \forall i \in V_0, \forall j \in V'_{N+1}, \forall k \in K_E, \end{aligned} \quad (24)$$

式中  $B$  为电池容量。

(12) 规定车辆离开充电站后的电量限制,即

$$\begin{aligned} 0 \leq y_i^k \leq Y_i^k - E_{ij}^k x_{ijk} + B(1 - x_{ijk}), \\ \forall i \in F', \forall j \in V'_{N+1}, \forall k \in K_E. \end{aligned} \quad (25)$$

(13) 确保电动车充电后的电量不超过电池容量,即

$$y_i^k \leq Y_i^k \leq B, \forall i \in F'. \quad (26)$$

### 3 算法设计

本研究的 MFVRPECCE 问题中考虑混合车队、时间窗、电动车荷电状态约束、完全充电约束等多个特征,为经典的非确定性多项式问题。遗传算法 (genetic algorithm, GA) 具有较强的鲁棒性<sup>[16]</sup>,但局部搜索能力较差,易出现早熟现象<sup>[17]</sup>。与之相比,模拟退火算法在局部寻优方面有很强的优势,以一定概率接受较差解,可以有效跳出局部最优<sup>[18]</sup>。因此,本研究提出一种遗传-变邻域模拟退火 (genetic-variable neighborhood simulated annealing, GAVNS) 算法进行求解,在变邻域操作中引入模拟退火思想,流程图如图 1 所示,其中  $p$  为选择较差解的概率,  $T$  为温度的模拟参数,  $\Delta C$  为新解和当代最优解的成本差。

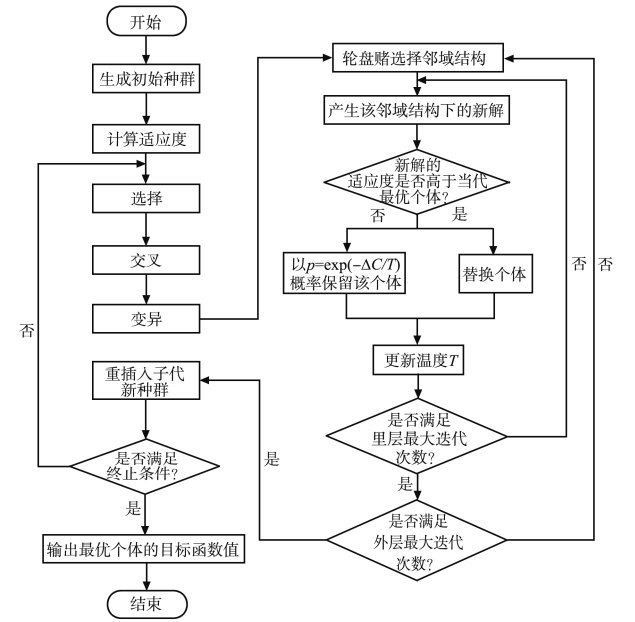


图 1 GAVNS 算法的流程图

Fig.1 The flow chart of GAVNS algorithm

#### 3.1 初始种群的生成

本研究的 MFVRPECCE 问题中,遵循电动车为主、燃油车为辅的原则<sup>[19]</sup>,按照以下步骤生成初始解。

(1) 随机生成一条染色体,在不违反车辆载质量约束的前提下划分配送路线,将每条路线上的客户按照左时间窗的大小进行排序。如果配送路线数量大于车辆总数,重复步骤(1)。

(2) 依次选取车辆配送路线,若该车辆是电动车,在服务完当前客户点后,判断剩余电量能否服务下一个客户点,如不满足,则前往距离当前客户

点和下一个客户点最近的充电站充电。

### 3.2 交叉操作

采用双点交叉操作,考虑 2 个交叉点  $L_1$  和  $L_2$  之间的片段,引入更多的基因组合,能够生成更加多样化的子代染色体,具有良好的可扩展性,适用于各种问题规模和复杂度的遗传算法应用,具体过程如图 2 所示。

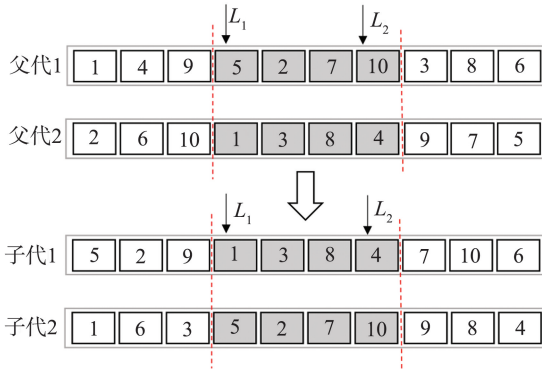


图 2 交叉操作

Fig.2 Crossover operator

### 3.3 变异操作

采用倒换变异操作,即从染色体中随机选取一个基因序列,将该序列中的基因打乱并重新插入原位置,具体过程如图 3 所示。

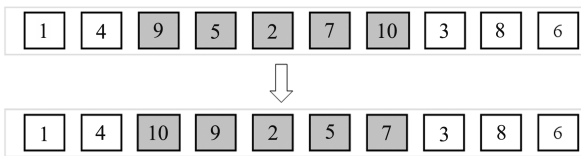


图 3 变异操作

Fig.3 Mutation operation

### 3.4 变邻域模拟退火操作

本研究将模拟退火思想引入变邻域搜索操作。模拟退火算法通过逐渐降低温度,使算法逐渐聚焦于搜索空间中的高质量区域,变邻域操作则通过不断在当前解的邻域内进行搜索,二者的结合有助于提高全局搜索能力和搜索效率。变邻域操作采用交换、逆转和插入方法以提高解的质量,具体过程如图 4 所示,其中  $i_1$  和  $i_2$  为插入的位置。

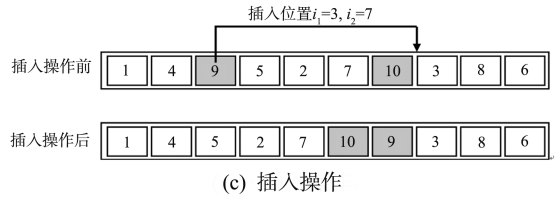
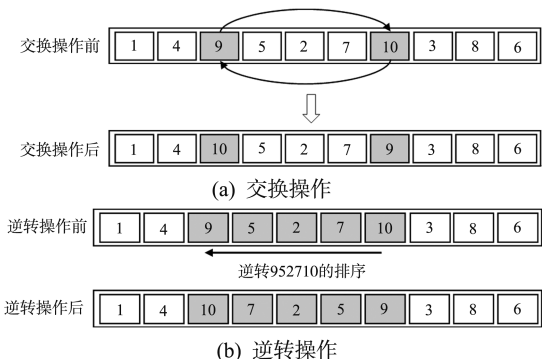


图 4 变邻域操作

Fig.4 Variable neighborhood operation

## 4 算例验证

### 4.1 算例数据

以上海市某配送中心为例,在混合车队总数为 8 辆时,进行油电车辆不同配置方案的产品配送。其中,电动车在满电状态下从配送中心出发,配送途中车辆电量不能低于 20%,可以多次使用同一个充电点。车辆参数设置如下:每辆车的最大载货量为 120 t,电池最大容量为 120 Ah,车辆行驶速度限定为 80 km/h,早到惩罚因数为 5 元/min,晚到惩罚因数为 10 元/min,其他能耗模型参数从文献[20]中获得。算法参数如下:种群大小取 100,迭代次数取 300,交叉概率取 0.9,变异概率取 0.1,代沟取 0.6,交换概率取 0.2,逆转概率取 0.5,插入概率取 0.3,冷却系数取 0.99,初始温度取 800 °C,终止温度取 20 °C。配送点的坐标、需求量、时间窗及服务时间如表 1 所示,配送点的节点分布如图 5 所示。

表 1 配送点的坐标、需求量、时间窗及服务时间  
Table 1 Coordinates, demand, time window and service time of distribution point

标号	x/km	y/km	需求量/t	左时间窗/min	右时间窗/min	服务时间/min
0	40	50	0	0	1 236	0
1	45	68	10	912	967	90
2	45	70	30	825	870	90
3	42	66	10	65	146	90
4	42	68	10	727	782	90
5	42	65	10	15	67	90
6	40	69	20	621	702	90
7	40	66	20	170	225	90
8	38	68	20	255	324	90
9	38	70	10	534	605	90
10	35	66	10	357	410	90
11	35	69	10	448	505	90
12	25	85	20	652	721	90
13	22	75	30	30	92	90
14	22	85	10	567	620	90
15	20	80	40	384	429	90
16	20	85	40	475	528	90
17	18	75	20	99	148	90
18	15	75	20	179	254	90
19	15	80	10	278	345	90

表 1(续)

标号	x/km	y/km	需求量/t	左时间窗/min	右时间窗/min	服务时间/min
20	30	50	10	10	73	90
21	30	52	20	914	965	90
22	28	52	20	812	883	90
23	28	55	10	732	777	90
24	25	50	10	65	144	90
25	25	52	40	169	224	90
26	25	55	10	622	701	90
27	23	52	10	261	316	90
28	23	55	20	546	593	90
29	20	50	10	358	405	90
30	20	55	10	449	504	90
31	10	35	20	200	237	90
32	10	40	30	31	100	90
33	8	40	40	87	158	90
34	8	45	20	751	816	90
35	5	35	10	283	344	90
36	5	45	10	665	716	90
37	2	40	20	383	434	90
38	0	40	30	479	522	90
39	0	45	20	567	624	90
40	35	30	10	264	321	90
41	35	32	10	166	235	90
42	33	32	20	68	149	90
43	33	35	10	16	80	90
44	32	30	10	359	412	90
45	30	30	10	541	600	90
46	30	32	30	448	509	90
47	30	35	10	1 054	1 127	90
48	28	30	10	632	693	90
49	28	35	10	1 001	1 066	90
50	26	32	10	815	880	90
51	20	70	0	1	1 236	0
52	35	45	0	1	1 236	0
53	15	60	0	1	1 236	0

注:标号 0 为配送中心,标号 1~50 为客户点,标号 51~53 为充电站。

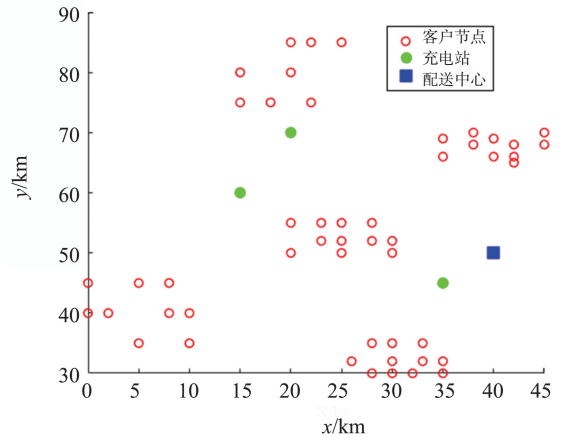


图 5 节点分布图谱

Fig.5 Node distribution diagram

### 4.2 与 CPLEX 求解结果的对比分析

为了评价所提 GAVNS 算法的性能,本研究给出 3 组案例数据(每组客户数量分别为 10、15 个)的最低成本和运行时间,如表 2 所示。设置 CPLEX 的最大运行时间为 7 200 s,当达到最大运行时间时,输出 CPLEX 当前求得的最低成本。利用 GAVNS 算法求解得到的小规模算例结果与 CPLEX 软件得到的最优结果进行比较,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,GAVNS 算法可以获得小规模问题的近似最优解,求解平均偏差为 0.66%。当算例变大(即客户数量增加到 15 个)时,解决问题的计算时间显著增加。虽然 CPLEX 与 GAVNS 在解决方案的质量方面具有相当的性能,但 CPLEX 求解器占用了大量的计算时间,而 GAVNS 能够执行得更快。因此,面对中型和大型实例集,GAVNS 启发式算法的效果更好。

### 4.3 遗传-变邻域模拟退火算法实现及收敛性分析

为了验证算法的有效性,引入传统 GA 及文献 [10] 提出的改进大邻域搜索(hybrid version of large neighborhood search, HLNS)算法与本研究算法进行对比,算法收敛效果如图 6 所示。

表 2 GAVNS 与 CPLEX 的比较

Table 2 Comparison of GAVNS and CPLEX

案例	客户数量/个	油车数量/辆	电车数量/辆	CPLEX		GAVNS		相对偏差/%
				最低成本/元	运行时间/s	最低成本/元	运行时间/s	
1	10	1	1	515.18	652.46	515.18	42.41	0
1	15	2	2	1 023.41	4 194.12	1 039.71	71.83	1.59
2	10	2	1	882.59	1 132.45	889.12	56.62	0.74
2	15	2	2	989.25	3 768.42	992.90	71.60	0.37
3	10	1	1	498.54	196.65	498.54	39.33	0
3	15	2	2	1 080.78	>7 200	1 094.69	69.99	1.29
平均								0.66

注:相对偏差为 GAVNS 算法求得的最低成本与 CPLEX 求得的最低成本之差较 CPLEX 的最低成本的比。

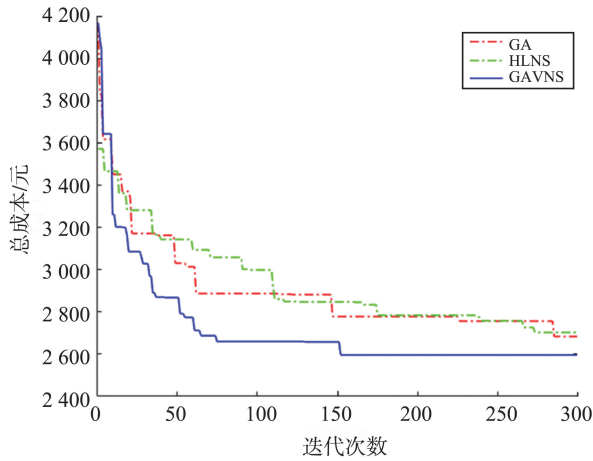


图 6 算法收敛效果对比图

Fig.6 Comparison of convergence between two algorithms

由图 6 可以看出;GA 与 HLNS 算法收敛缓慢,需要多次迭代才能得到较好的解,但是较易陷入局部最优解;本研究改进后的 GAVNS 算法在保证收敛速度的前提下,能够搜索到更优的解。相较于 GA 与 HLNS 算法,GAVNS 算法表现出较快的收敛速度和更高的精度水平,可以证明本研究算法求解 MFVRPECC 问题的有效性。

GAVNS 算法获得的最优方案(即同时派出 4 辆燃油车和 4 辆电动车)如表 3 所示。由表 3 可知:电动车配送路线 1、2 在配送中途前往充电站进行充电,但未对客户配送时间窗产生影响;路线 3 在配送中途 2 次前往充电站进行电量补充,产生额外的时间窗惩罚成本。

表 3 配送成本分析

Table 3 Distribution cost analysis

车辆	路线编号	路线	路线行驶总距离/km	总成本/元	碳排放成本/元	配送成本/元	时间窗惩罚成本/元	充电站使用次数	充电时长/min
电动车	1	0—3—33—27—10—51—9—48—49—0	195.54	285.69	0	285.69	0	1	147.84
	2	0—42—25—35—29—51—14—6—0	166.53	284.10	0	284.10	0	1	142.80
	3	0—17—40—15—53—36—50—52—1—47—0	292.12	346.98	0	315.97	31.07	2	280.63
	4	0—13—18—30—39—34—0	121.17	256.64	0	256.64	0	0	0
燃油车	5	0—32—31—8—11—26—21—0	116.30	375.77	118.12	257.65	0	0	0
	6	0—43—37—38—28—23—2—0	125.70	389.76	127.52	262.24	0	0	0
	7	0—20—24—7—19—16—12—4—0	119.81	380.78	121.49	259.29	0	0	0
	8	0—5—41—44—46—45—22—0	91.56	338.34	92.97	245.37	0	0	0

电动车配送路线的多指标分析如图 7 所示。由图 7 可以看出,电动车远距离行驶时,会产生额外的充电成本和时间窗惩罚成本。燃油车配送路线的多指标分析如图 8 所示。由图 8 可以看出,燃油车行驶距离越远,产生的配送成本和碳排放成本越高。

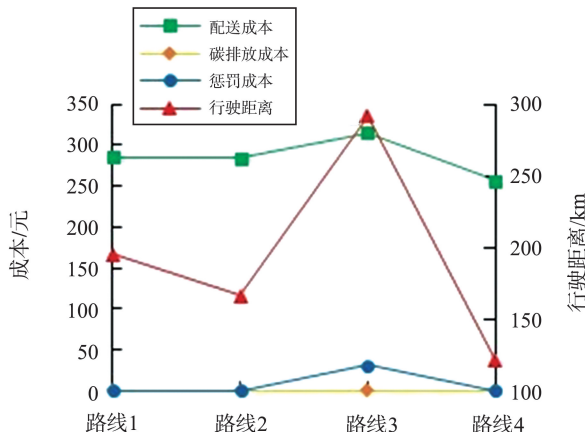


图 7 电动车多指标分析

Fig.7 Multi-index analysis of electric vehicle

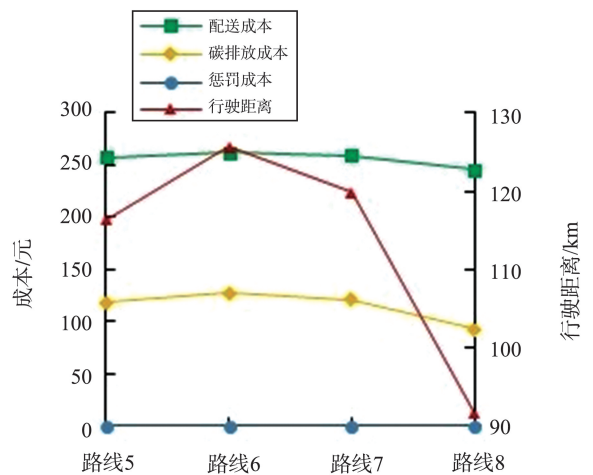


图 8 燃油车多指标分析

Fig.8 Multi-index analysis of fuel vehicle

GAVNS 算法解决了混合车队的配送求解问题,也对全燃油车和全电动车配送进行对比分析,结果如表 4 所示。由表 4 可以看出:与全燃油车配送方案相比,混合车队在碳排放成本上减少 62.2%,因为全燃油车配送时,碳排放成本较高;与全电动

车配送方案相比,混合车队在配送成本上减少 25.8%,时间窗惩罚成本降低 91.2%,由于车辆充

电,在配送路线中增加了额外的时间消耗,导致惩罚成本增加。

表 4 车辆配置成本效益

Table 4 Cost-effectiveness of vehicle configuration

车辆配置	总成本/元	碳排放成本/元	配送成本/元	时间窗惩罚成本/元	充电站使用次数	充电时长/min
混合车队	2 658.05	460.10	2 166.94	31.07	4	571.28
全电车队	3 272.32	0	2 919.59	352.73	7	948.68
全油车队	3 410.86	1 216.94	2 193.92	0	0	0

#### 4.4 油电混合车队配置策略分析

通过上述实例分析可知,采用混合车队配送可以在客户规定的时间窗口内对其提供配送服务,减少碳排放成本。为分析混合车队比例对配送方案的影响,定义电动车占比为  $\theta$ ,即电动车数量与车辆总数的比,取  $\theta$  为 12.5%、25.0%、50.0%、75.0%、87.5%,多次运行以平均最低成本描述优化结果,如图 9、10 所示。

因此,企业在考虑混合车队的配送模式时,要合理制定燃油车和电动车的车队结构,过度依赖电动车取代燃油车进行配送可能导致效益背反现象。

## 5 结论

在传统路径问题的基础上,本研究综合考虑混合车队、车辆载质量、多次充电对油耗和能耗的影响,构建数学模型进行案例分析。试验结果表明,采用混合车队配置能够显著降低运输成本,减少惩罚成本,削减碳排放成本,在运输效率、成本控制和环保性能上有一定的优越性。本研究提出的遗传-变邻域模拟退火算法在寻优效率方面有明显提高,可以有效解决混合车队车辆路径优化问题。根据混合车队中电动车占比影响可知,将燃油车和电动车按照 1:1 进行混合最优配置时,对企业的配送更有利。

本研究随机固定充电站的位置,但是这些假设与实际运营场景存在一定差别。根据实际情况进行充电站的选址,将使路径规划结果更具有实际应用意义。未来可以考虑将其他算法与 GAVNS 混合求解 MFVRPECC,以便在解的质量和计算时间方面取得更好的结果。

#### 参考文献:

- [1] VINCENT F Y, JODIAWAN P, GUNAWAN A. An adaptive large neighborhood search for the green mixed fleet vehicle routing problem with realistic energy consumption and partial recharges [J]. Applied Soft Computing, 2021, 105(5): 107251.
- [2] KESKIN M, ÇATAY B. A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers [J]. Computers & Operations Research, 2018, 100(12): 172-188.
- [3] ERDELIC T, CARIC T, ERDELIC M, et al. Electric vehicle routing problem with single or multiple recharges [J]. Transportation Research Procedia, 2019, 40: 217-224.
- [4] 葛显龙,李祖伟,葛小波.考虑灵活充电策略的带时间

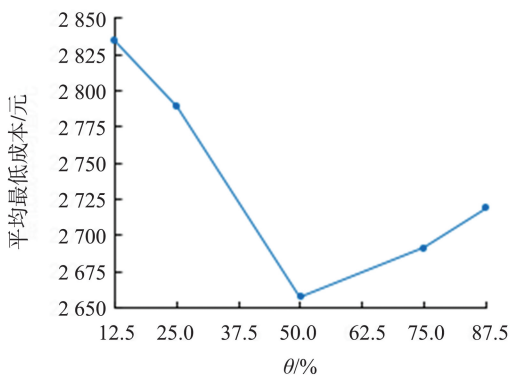


图 9 电动车占比灵敏度分析

Fig.9 Electric vehicle share sensitivity analysis

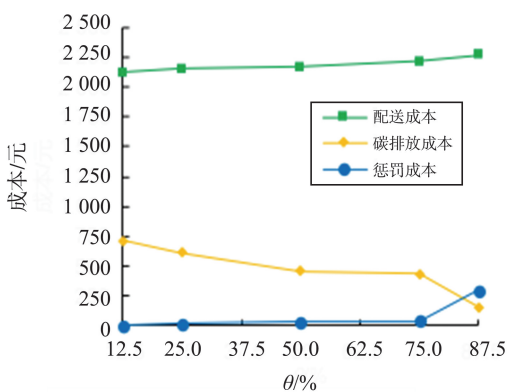


图 10 电动车占比配置分析

Fig.10 Electrical vehicle ratio configuration analysis

通过图 9、10 可以看出,改变燃油车和电动车的比例对总成本有一定影响。在本研究探讨的模型中,将这 2 种车型按照 1:1 进行混合使用时,取得的最优解相对较好。当电动车配置小于 50% 时,随着电动车数量增加,碳排放成本不断减小,总成本不断减小;当电动车配置大于 50% 时,随着电动车数量增加,额外的时间窗惩罚成本导致总成本增加。

- 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 Xianlong, LI Zuwei, GE Xiaobo. Optimization study of logistics distribution path with time window considering flexible charging strategy[J]. Control Theory and Applications, 2020, 37(6): 1293-1301.
- [5] 宋稚雅. 基于纯电动物流车的城市配送车辆路径问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- SONG Zhiya. Research on urban distribution vehicle path problem based on pure electric logistics vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiao Tong University, 2019.
- [6] BREUNIG U, BALDACCI R, HARTL R F, et al. The electric two-echelon vehicle routing problem[J]. Computers & Operations Research, 2019, 103(3): 198-210.
- [7] JIE W, YANG J, ZHANG M, et al. The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: formulation and efficient methodology [J]. European Journal of Operational Research, 2019, 272(3): 879-904.
- [8] 胡大伟, 刘成清, 胡卉, 等. 基于低碳视角的两阶段开放式选址路径问题: 燃油车与电动车对比[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(12): 3230-3242.
- HU Dawei, LIU Chengqing, HU Hui, et al. Two-stage open location path problem based on low-carbon perspective: comparison between fuel vehicles and electric vehicles[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2020, 40(12): 3230-3242.
- [9] MACRINA G, PUGLIESE L D P, GUERRIERO F, et al. The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows[J]. Computers & Operations Research, 2019, 101(1): 183-199.
- [10] MACRINA G, LAPORTE G, GUERRIERO F, et al. An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 276(3): 971-982.
- [11] 范厚明, 杨成, 张跃光, 等. 混合时间窗下多中心混合车队车辆路径优化研究[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(10): 3529-3546.
- FAN Houming, YANG Cheng, ZHANG Yueguang, et al. Research on vehicle path optimization for multi-center mixed fleet under hybrid time window [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(10): 3529-3546.
- [12] YU V F, JODIAWAN P, GUNAWAN A, et al. A mathematical programming model for the green mixed fleet vehicle routing problem with realistic energy consumption and partial recharges[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Piscataway, USA: IEEE, 2019: 1339-1343.
- [13] 蔡银怡. 考虑充电策略和非线性能量消耗的电动车配送路径规划研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- CAI Yinyi. Research on electric vehicle delivery path planning considering charging strategy and nonlinear energy consumption[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [14] BEKTAŞ T, LAPORTE G. The pollution-routing problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(8): 1232-1250.
- [15] 李军涛, 刘明月, 刘鹏飞. 生鲜农产品多车型冷链物流车辆路径优化[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 115-123.
- LI Juntao, LIU Mingyue, LIU Pengfei. Optimization of vehicle paths for fresh agricultural products in multi-vehicle cold chain logistics[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(7): 115-123.
- [16] 赵姣, 杨倩倩, 胡大伟, 等. 基于排队模型的电动物流车充电站选址和运输路径问题[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 47-59.
- ZHAO Jiao, YANG Qianqian, HU Dawei, et al. Location and transportation route problems of charging stations for electric logistics vehicles based on queuing model[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(2): 47-59.
- [17] 王恒, 徐亚星, 王振锋, 等. 基于道路状况的生鲜农产品配送路径优化[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(1): 126-135.
- WANG Heng, XU Yaxing, WANG Zhenfeng, et al. Optimization of fresh produce distribution paths based on road conditions[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(1): 126-135.
- [18] 宋修广, 郭鑫铭, 闫方, 等. 公路应急救援车辆智能调度技术[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(4): 1-17.
- SONG Xiuguang, GUO Xinming, YAN Fang, et al. Intelligent scheduling technology of highway emergency rescue vehicle[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(4): 1-17.
- [19] 侯登凯, 范厚明, 任晓雪. 时变路网下多中心混合车队联合配送车辆路径优化[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(1): 11-22.
- HOU Dengkai, FAN Houming, REN Xiaoxue. Path optimization of joint distribution vehicles in multi-center mixed fleet under time-varying road network[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2022, 48(1): 11-22.
- [20] GOEKE D, SCHNEIDER M. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 245(1): 81-99.