

# 动态环境下基于换电模式的电动车路径问题研究

周妮, 王文, 薛晗, 陈琼

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 在实际配送中, 考虑车速受不同天气、不同时段的影响, 根据电动车辆行驶速度与能耗之间的函数关系, 以电动车固定行驶成本、能耗成本、时间惩罚成本构成的总运输费用最小为目标, 以车辆载重、车辆电池容量、客户时间窗、车辆速度为约束条件, 构建动态环境下基于换电模式和时变速度的电动汽车路径优化模型。用遗传算法对模型求解, 采用实数编码、轮盘赌选择算子、随机单点交叉、随机变异的方式, 并以小变异率提高局部搜索能力, 然后与车辆速度恒定时的几种情况进行对比。试验结果表明, 所建立的优化模型更符合实际情况, 能够根据客户属性和动态环境下的路网特性, 合理安排发车、规划配送路径和顺序, 从而降低配送成本, 为物流企业运营车辆和优化配送提供参考。

**[关键词]** 物流配送; 时变速度; 遗传算法; 换电式电动车; 路径问题; 总运输费用

**[中图分类号]** U 116.2

## Research on the Path Issue of Electric Vehicles Based on the Power Swapping Mode in Dynamic Environment

ZHOU Ni, WANG Wen, XUE Han, CHEN Qiong

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In the actual distribution, considering the vehicle speed is affected by different weather and different time periods, according to the function relationship between speed and energy consumption of electric vehicles, with the objective of minimum total transportation cost composed of the fixed driving cost, energy consumption cost and time penalty cost of the electric vehicle, and with vehicle load, battery capacity, customer time window, and vehicle speed as constraints, a routing optimization model of electric vehicle based on power change mode and time-varying speed in dynamic environment is constructed. Genetic algorithm is used to solve the model with real number coding, roulette operator, random single point crossover, random variation, and small variation rate to improve the local search ability, and then it is compared with several cases when the vehicle speed is constant. The experimental results show that the established optimization model is more in line with the actual situation, and can reasonably arrange vehicle departures and plan distribution paths and sequences, according to the customer and road network in the dynamic environment, so as to reduce the distribution costs, and provide a reference for logistics enterprises to operate vehicles and optimize their distribution.

**[收稿日期]** 2022-04-25

**[基金项目]** 厦门市自然科学基金项目(3502Z20227212); 福建省中青年教育科研项目(JAT210221, JAT220181); 福建省本科高校教育教学研究项目(FBJG20220200); 国家自然科学基金项目(52201411); 集美大学科研基金项目(ZQ2022042)

**[作者简介]** 周妮(1997—), 女, 硕士生, 从事交通运输规划与管理方向研究。通信作者: 王文(1978—), 女, 博士, 副教授, 从事交通运输规划与管理方向研究。E-mail: wwns@jmu.edu.cn

**Keywords:** logistics engineering; time-varying speed; genetic algorithm; switching electric vehicles; path problems; total transportation cost

## 0 引言

针对电动汽车的车辆路径问题,国内外众多学者展开了广泛研究。Wang 等<sup>[1]</sup>把具体的定位信息加入到电动车路径问题中,提出一种混合启发式算法,将禁忌搜索算法与大规模邻域搜索算法结合进行强化求解。揭婉晨等<sup>[2]</sup>考虑到不同种类电动车辆的电池容量充电率和单位耗电率等诸多因素,设计了分级定价法求解。陈进博<sup>[3]</sup>建立了以时间窗为约束的换电模式的电动车辆路径优化模型,相比较于充电模式,换电模式具有一定的意义,但对车辆速度做了恒定处理,与现实有一定差距。Desaulniers 等<sup>[4]</sup>采用四种充电策略对比优化具有时间窗约束的电动车辆路径问题,最终得到最佳充电策略。李进等<sup>[5]</sup>假定车辆以恒定速度行驶,提出一种自适应遗传算法求解考虑载重、电池续航能力等约束的换电模式的电动车辆路径优化模型。有学者将电动车充电站选址与路径优化问题相结合进行研究,如 Yang 等<sup>[6]</sup>用自适应大邻域搜索算法求解考虑有载质量限制的电动车辆换电站选址-路径问题;Yang 等<sup>[7]</sup>研究了考虑与“里程焦虑”和“损失焦虑”相关的客户满意的充电站选址问题,采用禁忌搜索算法与贪心随机适应搜索(greedy randomized adaptive search procedure, GRASP)算法相结合方法求解。针对充、换电模式的研究,重点在于对电池的管理政策的研究,Bahrami 等<sup>[8]</sup>对插电式混合动力车进行了研究,建立了能源管理模型;杨磊等<sup>[9]</sup>研究了充、换电模式的充换电站选址问题,对比分析不同情形对结果的影响。对于带时间窗的车辆路径问题(VRPTW),邓丽娟等<sup>[10]</sup>重点研究了双目标时间窗 VRP 问题;Zhuang 等<sup>[11]</sup>指出 VRPSTW 比带硬时间窗的车辆路径问题拥有的可行解空间更大;Wu 等<sup>[12]</sup>用头脑风暴优化的蚁群算法求解带软时间窗的路径优化问题,并通过试验验证了算法的高效性。

从目前的研究来看,多数文献设置的车辆速度固定,单位里程耗能固定,而忽视了环境因素对车辆配送的影响;部分文献虽考虑了时变环境对配送过程的影响,但并未建立起与模型之间的联系。因此,本文拟一方面研究车速如何受天气和交通时况的影响;另一方面,鉴于能耗与车速之间的密切关系,探讨在电池续航以及换电站等各种约束条件下的电动汽车的物流配送问题,以期降低物流公司成本,提升最后一公里服务质量。

## 1 问题描述及模型构建

### 1.1 问题描述

某一配送中心具有多辆同种类型的电动物流车,所有车辆在电量满格状态下从配送中心载货出发,将货物运送到客户手中,客户点位置、换电站位置、服务时间窗都已知,中途可根据实际情况在换电站进行换电操作,最终再回到配送中心。建立优化模型满足车速限制和其他各种约束条件,达到物流公司成本和各种约束之间的最大平衡。对研究问题做以下 11 点假设:

- 1) 配送中心、换电站、客户点位置已知;
- 2) 车辆类别相同,即载重、行程限制、电池等相同;
- 3) 车辆可在中途的换电站更换满电状态的电池,考虑换电站整体服务水平较高,因此更换电池不需要排队等待,换电时间固定为某一常数;
- 4) 每辆车仅允许配送一次;
- 5) 车辆在电量满格状态下从中心出发,可保障车辆任意选择某一客户点进行访问,再返回中心;
- 6) 换电站没有容量限制,电池足够;
- 7) 一辆车可为多个客户点服务,每个客户点只能由一辆车服务,一个换电站可被多次访问;
- 8) 配送中心数量为单个;
- 9) 从配送中心出发的所有车辆电量都满格;

10) 车辆的等待和服务过程不消耗电量;

11) 客户要求配送的时间窗范围为  $[E_i, L_i]$ , 早到或者晚到客户仍会接受服务, 车辆早到会产生单位时间等待成本  $\lambda_1$ , 晚到会产生单位时间惩罚成本  $\lambda_2$ 。

## 1.2 变量和参数

本文建立模型的变量和参数有:  $P$ —配送中心;  $V$ —客户点集合;  $E$ —换电站集合;  $M$ —客户点、换电站集合;  $H$ —配送中心和客户点集合;  $O$ —配送中心、换电站、客户点集合;  $K$ —电动汽车集合;  $C$ —每辆电动车的固定使用成本 (元);  $d_{ij}$ —节点  $i$  到节点  $j$  之间的距离 (km);  $E_{E_i}$ —客户点  $i$  的最早开始服务时间;  $L_{L_i}$ —客户点  $i$  的最晚开始服务时间;  $[E_{E_i}, L_{L_i}]$ —客户点  $i$  的满意服务时间窗;  $q_i$ —客户点  $i$  的需求量 (kg);  $Q$ —单位车辆载质量 (kg);  $T$ —电动车电瓶最大容量 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ );  $\lambda_1$ —单位时间等待成本 ( $\text{元} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $\lambda_2$ —单位时间延误惩罚成本 ( $\text{元} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $f$ —单位耗电成本 ( $\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ );  $V_{ij(1)}$ —节点  $i$  行驶到节点  $j$  的速度下限 ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $V_{ij(2)}$ —节点  $i$  行驶到节点  $j$  的速度上限 ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $V_{ij}$ —节点  $i$  到节点  $j$  的行驶速度 ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $t_{ij}$ —节点  $i$  到节点  $j$  的行驶时间 (h);  $a_i$ —客户点  $i$  的服务时间 (h);  $m$ —车辆  $k$  在换电站  $e_i$  的换电时间 (h);  $t_{ki(1)}$ —车辆  $k$  到达节点  $i$  的时刻;  $t_{ki(2)}$ —车辆  $k$  离开节点  $i$  的时刻;  $W_{ki}$ —车辆  $k$  到达客户点  $i$  的载质量 (kg);  $S_{ki(1)}$ —车辆  $k$  到达节点  $i$  的剩余电量 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ );  $S_{ki(2)}$ —车辆  $k$  离开节点  $i$  的剩余电量 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ );  $\gamma(v_{ij})$ —里程消耗电量 ( $\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-1}$ ), 是  $v_{ij}$  函数。

车辆到达时间  $t_i$  与客户满意度  $S(t_i)$  的关系如图 1 所示。

总惩罚成本 (等待成本和惩罚成本) 为

$$G(t_i) = \begin{cases} \lambda_1(E_i - t_i), & [E_{E_i}, E_i], \\ 0, & [E_i, L_i], \\ \lambda_2(t_i - L_i), & [L_i, L_{L_i}]. \end{cases} \quad (1)$$

考虑天气以及一天中早晚高峰时期对车辆行驶速度的影响, 定义不同天气、不同时段的车速为时变速度  $V = \bar{v}(1 - \theta)$ 。其中:  $\bar{v}$  是配送车辆的平均速度;  $\theta$  表示不同天气、不同时段对车辆速度的影响率。车辆在路段  $(i, j)$  的行驶时间  $t_{ij} = d_{ij}/V_{ij}$ 。其中:  $V_{ij}$  为车辆在路段  $(i, j)$  的平均速度。

本文沿用龚大鹏<sup>[13]</sup>和王恒等<sup>[14]</sup>的研究中对不同天气的界定和说明, 以及不同天气状况下、不同时段对车辆速度的影响率。

在文献 [15] 中发现, 车辆的行驶里程与速度之间呈二次函数关系的能耗模型与实际情况的拟合度更好, 且每公里能耗与行驶里程呈负相关关系, 因此能耗估算公式为

$$\gamma(v_{ij}) = \alpha v_{ij}^2 + \beta v_{ij} + r, \forall i, j \in O. \quad (2)$$

其中:  $\alpha, \beta, \gamma$  为常数。

## 2 模型的建立

模型目标函数为

$$D_{\min} = D_1 + D_2 + D_3, \quad (3)$$

$$D_1 = \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} C \times x_{pjk}, \quad (4)$$

$$D_2 = \sum_{i \in O} \sum_{j \in O} \sum_{k \in K} f \times \gamma(v_{ij}) \times d_{ij} \times x_{ijk}, \forall i \neq j, \quad (5)$$

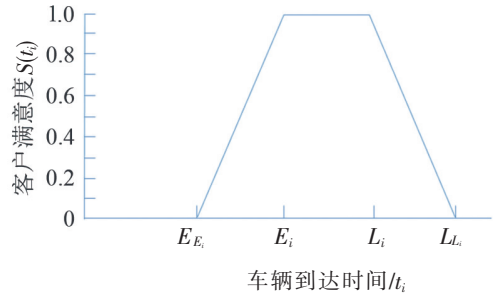


图 1 客户满意度示意图

Fig.1 Customer satisfaction diagram

$$D_3 = \lambda_1 \sum_{i=1}^n \max[(e_i - t_i), 0] + \lambda_2 \sum_{i=1}^n \max[(t_i - l_i), 0], \quad (6)$$

$$\gamma(v_{ij}) = \alpha V_{ij}^2 + \beta V_{ij} + \gamma; \forall i, j \in O. \quad (7)$$

其中:  $\alpha, \beta, \gamma$  为常数。

模型的约束条件为

$$V_{ij(1)} \leq V_{ij} \leq V_{ij(2)}; \quad (8)$$

$$t_{ki(1)} + a_i + x_i(E_i - t_{ki(1)}) = t_{ki(2)}, \forall i \in V, \forall k \in K; \quad (9)$$

$$x_i = \{0, 1\}, t_{ki} < E_i, x_i = 1, \text{否则}, x_i = 0; \quad (10)$$

$$t_{k0(1)} = 0, \quad (11)$$

$$t_{ki(2)} = t_{ki(1)} + m, \forall i \in E, \forall k \in K; \quad (12)$$

$$[x_i(E_i - t_{ki(1)}) + a_i + t_{ij}]x_{ijk} \leq t_{kj(1)}, \forall i \in H, \forall j \in M, \forall k \in K; \quad (13)$$

$$t_{ki(1)} + (m + t_{ij})x_{ijk} \leq t_{kj(1)}, \forall i \in E, \forall j \in H, \forall k \in K; \quad (14)$$

$$\sum_{i \in V} q_i (\sum_{j \in M} x_{ijk}) \leq Q, \forall k \in K; \quad (15)$$

$$0 \leq W_{kj} \leq W_{ki} - q_i x_{ijk}; \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in O} x_{ijk} = 1, \forall i \neq j \in V; \quad (17)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} - \sum_{i \in O} x_{ijk} = 0; \forall k \in K, \forall j \neq i \in M; \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in M} x_{pik} = \sum_{k \in K} \sum_{j \in M} x_{jpk}; \quad (19)$$

$$S_{ki(2)} = T, \forall k \in K, \forall i \in E; \quad (20)$$

$$S_{ki(2)} = T, \forall k \in K, \forall i \in P; \quad (21)$$

$$S_{ki(1)} = S_{ki(2)} \leq T, \forall i \in V; \quad (22)$$

$$0 \leq S_{kj(1)} \leq S_{ki(2)} - \gamma(v_{ij})d_{ij}, \forall i \in V, \forall j \in O, \forall k \in K, i \neq j; \quad (23)$$

$$\sum_{i \in O} x_{ijk} = 1, \forall j \in V, i \neq j, \forall k \in K; \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} x_{pj k} \leq K; \quad (25)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{当车辆经过边}(i, j) \text{时}, x_{ijk} = 1, \text{否则} = 0; \end{cases} \quad (26)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \sum_{f \in E} \max[0, S_{ki(2)} - f(v_{ij})(d_{ij} + d_{jf})] > 0 \\ 0 & \sum_{f \in E} \max[0, S_{ki(2)} - f(v_{ij})(d_{ij} + d_{jf})] = 0 \end{cases}, \forall i \in V, j \in V, i \neq j, k \in K. \quad (27)$$

其中: 模型目标函数 (3) 的  $D_{\min}$  是总成本最小,  $D_1$  为车辆使用成本, 仅与车辆使用总数和单位车辆使用成本有关,  $D_2$  为耗电成本,  $D_3$  为惩罚成本; 条件 (7) 表示能耗随速度的增大先增大后减小, 当速度在  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  左右时能耗达到最大值, 行驶里程与每公里能耗呈负相关; 条件 (8) 是对行驶速度的约束; 条件 (9) 到 (14) 是对时间的约束, 其中 (9) 表示车辆到达客户点  $i$  的时间加上服务时间和早到时的等候时间 (若有) 等于车辆  $k$  离开客户点  $i$  的时间, 条件 (10) 表示车辆是否需要等待顾客, 条件 (11) 表示车辆  $k$  离开中心的时刻为 0, 条件 (12) 表示车辆到达时刻加上换电操作过程所用时间等于车辆离开换电站的时间, 条件 (13) 表示车辆  $k$  到达中心或客户点  $i$  的时刻经过等待时间 (若有) 和服务时间及行驶时间后的时刻要早于或者等于到达客户点  $j$  的时刻, 条件 (14) 表示车辆  $k$  到达换电站  $i$  时刻经过换电和行驶时间要早于或者等于到达下一节点  $j$  的时刻; 条件 (15) 表示车辆  $k$  运输一次的客户点总需求量低于车辆最大载质量; 条件

(16) 表示车辆到达客户点  $i$  的载质量减去客户点  $i$  需求量与车辆到达下一客户点  $j$  的载质量之间的关系; 其中条件 (17) 是指每个客户点只能由一辆电动车服务; 条件 (18) 表示各节点进出平衡; (19) 表示车辆从中心出发并最终回到中心; 条件 (20) 和 (21) 表示车辆离开换电站和中心时均为满电状态; 条件 (22) 表示车辆到达客户点的电量与离开客户点的电量相同; 条件 (23) 保证了电动车离开客户点  $i$  时的剩余电量能够到达下一节点  $j$ ; 条件 (24) 能够保证每个客户点都能被访问到; 条件 (25) 是对车辆总数的约束; 条件 (26) 中  $x_{ijk}$  为 0/1 变量; 条件 (27) 表示车辆  $k$  离开  $i$  客户点时的剩余电量需要大于路段  $(i, j)$  所消耗电量加上客户点  $j$  到换电站或者配送中心的电量, 否则, 需要去换电站换电。

3 模型求解

车辆路径问题属于非确定性多项式问题, 本文采用遗传算法求解模型。遗传算法在求解复杂非线性优化问题方面有独特的优势: 1) 传统优化算法对单一可行解多次迭代寻优, 而遗传算法可对种群中多个个体同时编码, 求解过程中可同时迭代多个可行解, 并且在适应度函数不连续、不规则情况下, 仍能在许多个体中找到最优解, 因此算法全局搜索能力强; 2) 遗传信息可变, 增加了全局算法搜索速率; 3) 算法覆盖范围和适用领域广, 操作性强, 可较快得到相对复杂问题最优解; 4) 不需要额外辅助函数进行计算。与其他智能优化算法比较来看, 粒子群算法较容易陷入局部最优, 禁忌搜索算法参数较多且对问题的建模有一定要求, 蚁群算法参数调节较困难, 因此本文选择遗传算法求解。算法步骤如下:

第一步, 初始化种群。个体编码方法有二进制编码和实数编码, 本文采用实数编码, 即若干个实数随机排列, 设置最大终止迭代次数  $T$ , 随机生成  $N$  个初始个体作为初始群体。

第二步, 确定适应度函数。适应度可判定染色体的优劣, 将总距离的倒数作为适应度函数, 计算初始种群每个个体的适应度。适应度越高, 越容易遗传给下一代。

第三步, 选择算子。通过选择合适的算子进行迭代, 能够得到适应度更好的个体, 使优秀基因得到遗传, 最终越来越接近最优解。常规选择算子的方法有轮盘赌法、最佳保留选择方法、随机竞争等, 本文采用轮盘赌法。

第四步, 交叉运算。随机选择父代两个个体的交叉点交叉基因片段, 形成新的染色体, 使优秀基因得到保留, 形成新的优秀种群。常规的交叉算子有单点交叉、均匀交叉和多点交叉等, 本文随机选择父代两个个体的交叉点进行单点交叉。

第五步, 变异运算。以设置的小变异率对群体中的个体串的基因片段做随机变动, 从而产生新的个体, 能够提高基因的多样性, 使遗传算法具有局部搜索能力。初始群体经过选择、交叉、变异操作后得到新的下一代群体。

第六步, 终止条件判断。通常当达到最大进化代数、指定进化时间或者适应度值未发生变化时, 算法终止, 本文设置进化代数作为终止条件。

图2 为遗传算法流程图。

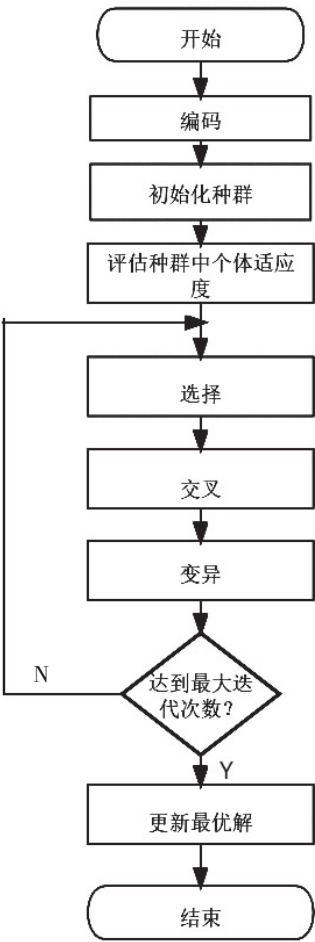


图2 遗传算法流程图  
Fig.2 Flow chart of the genetic algorithm



4 算例分析

4.1 算例信息

某公司在某城市有一配送中心，24 h 营业。假设该公司有若干辆规格相同的电动汽车，选取该公司 30 个客户点的数据，包括：客户点位置、需求量、客户时间窗。图 3 为配送中心、换电站、顾客点的具体位置分布信息。

4.2 参数设置

使用 MATLAB 2020b 设计遗传算法对以上实例求解。仿真环境在 Windows 10、2.50 GHz 的 AMD 四核、A10 处理器和 4GB 内存的计算机上实现。根据遗传算法对于规模、进化代数、交叉和变异概率的一般设置规律，结合本算例单配送中心配送规模较小的情况，并希望适当提高搜索速度，于是提设置相关参数为：种群规模 50，终止进化代数 200，交叉概率 0.3，变异概率 0.1，每辆车固定成本 ( $C$ ) 150 元，单位耗电成本 ( $f$ )  $1.7 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ ，时间惩罚 ( $\lambda_1$ )  $0 \text{ 元} \cdot \text{min}^{-1}$ ，时间惩罚 ( $\lambda_2$ )  $0.5 \text{ 元} \cdot \text{min}^{-1}$ ， $\alpha$  0.000 277 1， $\beta$  -0.03， $\gamma$  1.97，电动汽车电量限  $80 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，平均车速  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，电动汽车续航里程 120 km，电动汽车额定载重 1500kg。

4.3 求解结果

以晴天为例，计算结果收敛曲线如图 4 所示。晴天状态下每辆车最佳路线如图 5 所示，路线较为混乱，是由于车辆需优先服务时间点相对靠前的客户，在满足车速等限制下选择此路线，降低车辆使用成本和惩罚成本，将运输成本达到最低。

图 6、图 7、图 8 分别为雨天、雪天、雾天状态的算法收敛曲线，都取得了较好的收敛效果。

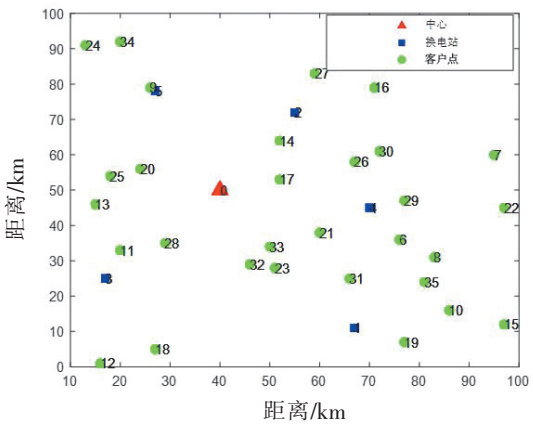


图 3 配送中心、换电站、顾客点位置分布图  
Fig.3 Location map of centers,exchange stations and customer points

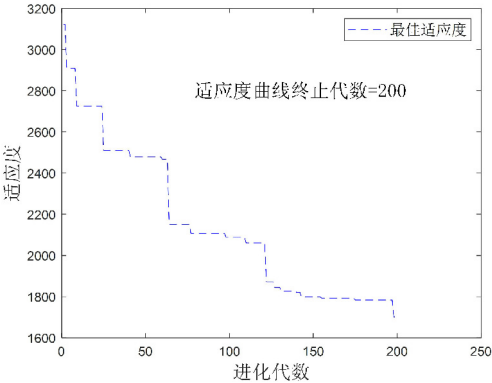


图 4 晴天状态的算法收敛曲线

Fig.4 Convergence curve of the algorithm for the sunny weather state

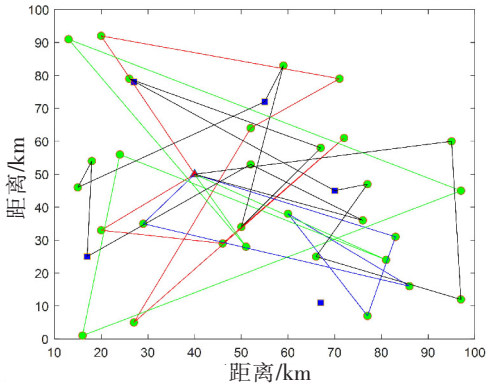


图 5 晴天状态的最佳路径图

Fig.5 Optimal path diagram for sunny conditions

晴天最优配送路径：0-11-32-30-18-14-16-34-0；0-8-19-21-10-28-0；0-23-24-22-12-20-35-0；0-7-15-31-29-4-9-26-33-27-2-13-25-3-17-6-0。配送总成本为 1865 元。

雨天最优配送路径 0-19-35-29-9-15-6-0；0-12-31-32-16-10-2-28-13-11-4-8-14-25-0；0-22-18-21-17-7-24-0；0-34-23-27-5-20-33-26-30-0；配送总成本为 2201.6 元。

雪天最优配送路径 0-32-13-7-14-31-5-15-21-23-0；0-33-22-26-10-11-0；0-34

-35 -28 -29 -18 -27 -4 -30 -19 -16 -0; 0 -25 -8 -6 -24 -12 -17 -20 -0。配送总成本为 2022.3 元。

雾天最优配送路径: 0 -33 -12 -20 -29 -5 -7 -15 -26 -6 -0; 0 -23 -11 -34 -22 -35 -17 -31 -0; 0 -13 -16 -25 -18 -14 -10 -19 -2 -30 -27 -28 -0; 0 -9 -21 -8 -3 -24 -32 -0。配送总成本为 2426.8 元。

以晴天状况为例, 假定车辆行驶平均速度为 30、40、50 km/h, 以及能耗消耗最小时的速度为 54.132 km/h, 以时变速度与上述假定的平均速度进行对比, 对模型求解 5 次的结果如图 9 所示。

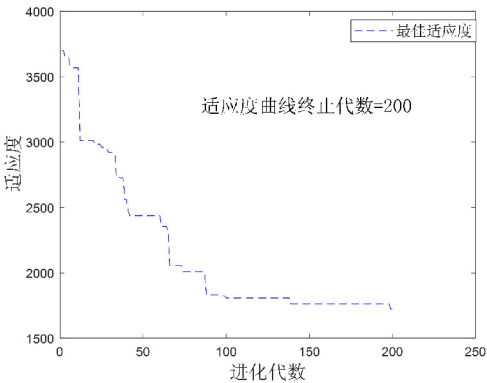


图 6 雨天状态的算法收敛曲线

Fig.6 Convergence curve of the algorithm for the rainy weather state

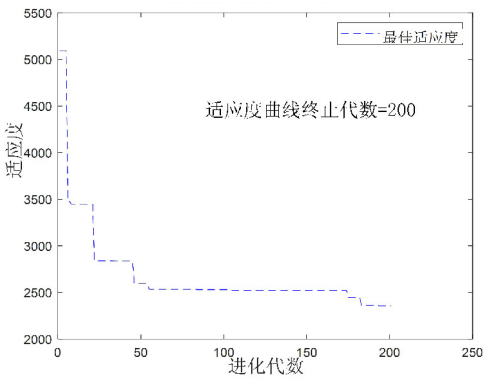


图 7 雪天状态的算法收敛曲线

Fig.7 Convergence curve of the algorithm for the snow weather state

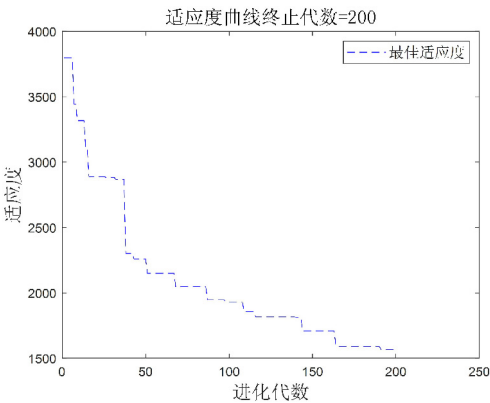


图 8 雾天状态的算法收敛曲线

Fig.8 Convergence curve of the algorithm for the fog weather state

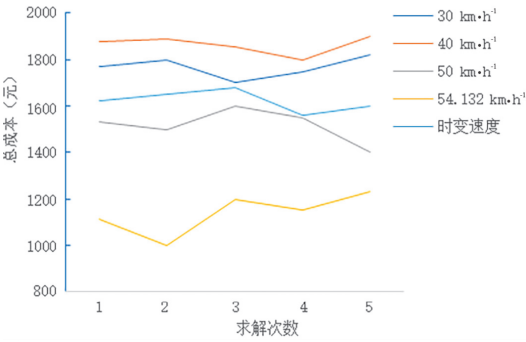


图 9 不同速度的求解对比

Fig.9 Comparison of solutions for different speeds

总成本结果对比显示, 车速 50 km/h 以下时, 本模型时变速度的结果最优; 车速 50 km/h 以上时, 在能耗消耗最低时的速度下的总成本最低, 且成本对速度的弹性明显增加。说明在路况较好、交通量少、天气较好的情况下应尽量提高车速, 接近能耗最低的速度并保持恒定, 可以有效降低总成本, 但城市中中短距离配送的车速一般在 30 ~40 km/h 或更低, 这样本文的时变速度在实际条件下就会获得较优结果。另外, 在实际天气、路况中, 车辆行驶速度基本达不到恒定不变, 因此时变速度的优化模型更符合配送的实际情况, 且总成本更优。

5 结论

发展电动汽车是我国能源动力系统转型和汽车行业未来发展的方向, 研究基于换电式电动汽车的物流配送路径规划具有重要的现实意义, 能为物流行业提供新能源时代安排车辆配送业务较优的方

法。本文以节能减排的电动汽车配送为背景,研究配送中心—多客户点—多车辆换电式配送路径优化模型。考虑具有时变特性的道路状况与不同天气条件对车速度的综合作用,采用能耗与行驶速度的二次函数关系,与实际情况拟合度更好,使模型对解决实际问题更有效。考虑服务时间的惩罚,一体化供需双方利益,有助于提高配送服务水平、获得稳定和可持续的客户关系。遗传算法具有全局搜索能力强、效率高等优势,更适合于这类复杂非线性规划模型求解。算例表明模型能有效解决实际问题,算法能够较快收敛求得满意的可行解。与传统平均行驶速度的设定所得结果进行对比,从符合实际的角度看,本模型时变速度的结果最优。可在今后的研究中进一步考虑多配送中心、车辆共享、路面因素、换电排队、退换货等情况,以及包括成本、时间、运力利用、服务质量等多目标规划下的配送优化问题。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] LI Y W, YUAN B S. Multiple charging station location routing problem with time window of electric vehicle[J]. Journal of Engineering and Technology Review, 2015, 8(5):190-201.
- [2] 揭婉晨,杨珺,杨超. 多车型电动汽车车辆路径问题的分支定价算法研究[J]. 系统工程理论与实践,2016,36(7):1795-1805.
- [3] 陈进博. 基于换电站的带时间窗电动车辆路径优化问题研究[D]. 北京:清华大学,2016.
- [4] DESAULNIERS G, ERRICO F, IRNICH S, et al. Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows[J]. Operations Research,2016,64(6):1388-1405.
- [5] 李进,王凤,杨沈宇. 换电模式下电动车货运路径优化模型与算法[J]. 计算机应用,2021,41(6):1792-1798.
- [6] YANG J, SUN H. Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles[J]. Computers and Operations Research,2015,55:217-232.
- [7] YANG J, F GUO, ZHANG M. Optimal planning of swapping/charging station network with customer satisfaction[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2017, 103:174-197.
- [8] BAHRAMI S, NOURINEJAD M, AMIRJAMSHIDI G, et al. The plugin hybrid electric vehicle routing problem: a power-management strategy model[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 111:318-333.
- [9] 杨磊,郝彩霞,唐瑞红. 基于电动物流车的充电和换电设施选址模型[J]. 系统工程理论与实践,2019,39(7):1781-1795.
- [10] 邓丽娟,张纪会. 混合蚁群算法求解双目标时间窗 VRP[J]. 复杂系统与复杂性科学,2020,17(4):73-84.
- [11] ZHANG H, ZHANG Q, MA L, et al. A hybrid ant colony optimization algorithm for a multi-objective vehicle routing problem with flexible time windows[J]. Information Sciences, 2019,490:166-190.
- [12] WU L, HE Z, CHEN Y, et al. Brainstorming-based ant colony optimization for vehicle routing with soft time windows[J]. IEEE Access, 2019,7:19643-19652.
- [13] 龚大鹏. 雨雪天气对城市道路交通运行的影响研究[D]. 北京:北京大学,2016.
- [14] 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.
- [15] 张家玮. 基于数据驱动的电动汽车行驶里程模型建立与分析[D]. 北京:北京交通大学,2015.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)