

# 时变路网下电动汽车冷链配送路径规划研究

温廷新<sup>\*1</sup>, 李可昕<sup>1</sup>, 赵琳琳<sup>2</sup>, 栗业<sup>1</sup>, 周甜<sup>1</sup>, 何燕<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105;

2. 山东工商学院 管理科学与工程学院, 山东 烟台 264005)

**摘要:** 在双碳背景下, 电动汽车已在物流行业快速普及. 在满足生鲜品的新鲜程度、车辆限载及电动汽车的电量限制等约束条件下, 将电动汽车充电过程所产生成本纳入目标函数中, 构建了时变路网下带软时间窗的电动汽车多温共配路径优化模型. 根据该模型的特点, 引入 K-means 聚类对客户进行聚类, 同一聚类单元内设计免疫遗传算法, 得到启发式路径优化方案. 实验结果表明, 根据顾客的需要及时变路网特性, 合理安排运输规划与配送路径, 保证了生鲜品运输的时效性; 采用电动汽车多温共配的运输方式进行运输, 运输成本更加低廉、过程更加节能, 提高了企业的经济效应.

**关键词:** 电动汽车; 多温共配; 生鲜品运输; K-means 聚类; 免疫遗传算法

**中图分类号:** U429.6

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb202206012

## 0 引言

随着工业的迅猛发展, 全球气候问题日益突出, 能源转型战略深入, 低碳、节能、环保等方面问题引起广泛关注. 2021 年中国提出构建以新能源为主体的新型电力系统. 采用电动汽车进行物流配送, 成为未来物流发展的方向和趋势. 电动汽车低能耗、低噪声, 但是因充电时间长及当前充电站短缺, 而受到极大约束, 如何对电动汽车进行合理调派成为热议问题<sup>[1-2]</sup>.

已有众多国内外学者对物流配送过程中碳排放的产生展开研究. 韩飒<sup>[3]</sup>根据车联网技术, 提出了一种道路交叉口环保驾驶汽车路径优化控制模型. 唐金环等<sup>[4]</sup>针对考虑顾客有限“碳行为”偏好的选址-路径-库存联合优化问题, 引入环保度系数作为碳排放量的特征向量, 构建了选址-路径-库存系统中考虑有“碳行为”偏好的联合优化模型. 戢守峰等<sup>[5]</sup>根据道路类型和行驶状态的不同, 将限速和拥堵因素嵌入模型的构建. Guo 等<sup>[6]</sup>考虑到车辆的负载和驱动距离, 建造了相应的碳排放模型并将其设为优化目标. 鲁建厦等<sup>[7]</sup>为提高

子母穿梭车密集仓储系统运作效率, 对系统的复合作业三维路径规划问题进行了研究.

近年来, 电动汽车的应用使碳排放过高的问题得到部分解决. 电动汽车的合理调派问题已经成为诸多学者正向热议的话题. 郭戈等<sup>[8]</sup>分析电动汽车的发展现状, 并从充电优化、路径优化及车队配置优化等角度进行了车辆路径优化. 邓友均等<sup>[9]</sup>为提高电动汽车的配送效率, 避免大规模无序充电的影响, 借助群感知技术, 提出了基于实时交通信息感知的充电站充电服务费计价模型和基于排队论的充电排队等候时间估算模型. 为进一步求解模型, 多数学者采用了智能优化算法, 如结合分散搜索和改进蚁群算法的混合启发式算法<sup>[10]</sup>、禁忌搜索-改进 Clarke-Wright 节省的两阶段启发式算法<sup>[11]</sup>、基于细菌趋化的改进粒子群算法<sup>[12]</sup>、多阶段启发式算法 MCWIGALNS<sup>[13]</sup>、自适应改进的蚁群算法<sup>[14]</sup>、变邻域搜索算法<sup>[15]</sup>、改进的粒子群算法<sup>[16]</sup>等.

综合上述研究, 大多数学者对电动汽车配送网络中设施选址与配送路径优化方面的问题展开

收稿日期: 2021-12-14; 修回日期: 2022-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71771111); 山东省社会科学基金资助项目(20DGLJ014); 辽宁省教学改革研究项目(辽教办[2021]254号).

作者简介: 温廷新<sup>\*</sup>(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: wen\_tx@163.com; 李可昕(1997-), 女, 硕士生, E-mail: 118341848862@163.com.

研究,但是罕见学者考虑充电过程成本和不同温层货损的电动汽车多温共配路径优化问题.鉴于此,本文在满足生鲜品的新鲜程度、车辆限载及电动汽车电量限制等约束条件下,将电动汽车充电所产生电费及充电时生鲜品货损成本纳入目标函数,构建以带软时间窗的路径优化模型为基础的电动汽车多温共配路径优化模型,引入 K-means 聚类,并采用免疫遗传算法对同一聚类单元进行优化.

## 1 生鲜品运输路径优化模型建立

### 1.1 问题描述

本文所研究的问题具体可以描述为某生鲜企业采用电动汽车进行配送的问题.电动汽车与传统汽车相比具有节能减排、降低总体运输成本、符合当下低碳生活的背景以及政府扶持政策较多等优势,但同时也有很多的不足之处:首先,电动汽车电池成本较高;其次,电动汽车的蓄电池受季节因素影响较大,随着温度的降低,续航时间将会缩短;最后,电池充电时间较长,在充电时间内汽车处于停滞状态.

配送采用电动汽车作为主要交通工具,并在车辆上放置处于不同温层的蓄冷箱,每个蓄冷箱在每日结束工作后进行蓄冷以保证第二天的使用.配送车辆从配送中心充满电后出发为顾客提供配送服务.每辆车可以为多个顾客提供配送服务,而每位顾客只能接受一辆车的配送服务,车辆完成配送服务后要返回配送中心.每辆车有配送的容量限制,因此其所服务的顾客的总需求量不得超过车辆的最大载重.每辆车所行驶的最大路程与车辆的蓄电量成正比,文中假设每个顾客的需求及时间窗已知,时变路网数据信息已从交通管理部门获取,电动汽车处于低电量时需在顾客点进行快速充电并支付一定的费用.文中所建模型暂不考虑极端天气和电池损耗等因素影响,并默认电动汽车可在各节点进行充电并支付相应的费用.

### 1.2 符号及参数

#### (1) 集合

$N$  表示路网中所有节点的集合.其中 0 表示配送中心.

#### (2) 参数

$q$ 、 $Q$  分别表示电动汽车最大载重和电动汽车裸车重; $v$  表示电动汽车的行驶速度; $M_{\max}$  表示电

动汽车的最大电池容量; $M_{ijh}$  表示电动汽车  $h$  从节点  $i$  到节点  $j$  的耗电量; $M_{jh}$  表示电动汽车  $h$  在节点  $j$  的剩余电量; $R$  表示电动汽车的充电频率; $h$  表示第  $h$  辆电动汽车; $H$  表示电动汽车集合; $n$  表示电动汽车总数; $m$  表示节点总数; $F$  表示单位车辆固定成本; $B$  表示车辆单位运输成本; $d$  表示节点之间的距离; $P_1$  表示冷冻区货物的价格; $P_2$  表示冷藏区货物的价格; $P_3$  表示常温区货物的价格; $w_1$  表示运输过程中冷冻区单位货损比例; $w_2$  表示服务顾客过程中冷冻区单位货损比例; $w_3$  表示充电过程中冷冻区单位货损比例; $z_1$  表示运输过程中冷藏区单位货损比例; $z_2$  表示服务顾客过程中冷藏区单位货损比例; $z_3$  表示充电过程中冷藏区单位货损比例; $t_{ij}$  表示配送车辆从节点  $i$  到节点  $j$  的时间; $t_{j1}$  表示车辆为顾客  $j$  服务时冷冻区所产生的时间; $t_{j2}$  表示车辆为顾客  $j$  服务时冷藏区所产生的时间; $r_j$  表示在顾客  $j$  处充电时间; $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示时间窗的机会成本和惩罚成本; $S$  表示配送车辆到达时间; $(L, T)$  表示顾客的配送时间窗; $U$  表示损失的冷量; $E$  表示单位冷量需要的电量; $P_4$  表示单位电量所需的电价; $a_1$  表示在运输过程中冷冻区冷量损失; $a_2$  表示在运输过程中冷藏区冷量损失; $b_1$  表示在服务顾客时冷冻区冷量损失; $b_2$  表示在服务顾客时冷藏区冷量损失; $k$  表示充电每小时所需的电费; $e_1$  表示每个顾客在冷冻区需求; $e_2$  表示每个顾客在冷藏区需求; $e_3$  表示每个顾客在常温区需求.

#### (3) 决策变量

$x_{ijh}$  表示车辆  $h$  在道路  $(i, j)$  路段行驶时为 1, 否则为 0; $y_{jh}$  表示车辆  $h$  为顾客  $j$  服务时为 1, 否则为 0; $z_{jh}$  表示车辆  $h$  在顾客  $j$  处充电时为 1, 否则为 0.

### 1.3 相关因素分析

1.3.1 耗电性能及充电需求分析 电动汽车的耗电量不仅与车辆的自身属性有关,还与车辆的实际行驶距离和速度有关,因此,实际最大载重  $q$  的电动汽车  $h$  以速度  $v$  行驶,运行功率为

$$P(q_h, v) = \frac{(Q + q_h)g\varepsilon v + \frac{C_d A v^3}{21.15}}{3600\eta} \quad (1)$$

式中: $g$  为重力加速度; $\eta$  为传动系统机械效率; $\varepsilon$ 、 $C_d$ 、 $A$  分别表示汽车滚动阻力系数、空气阻力系数和汽车迎风面积.

电动汽车在运输道路上消耗的电量为

$$M_{ijh} = P(q_h, v_{ij})t_{ij} \quad (2)$$

在电动汽车的剩余电量不足以满足配送下一位顾客时,需要在配送途中进行快速充电,电动汽车在充电站充电的时间为

$$r = \sum_{j=0}^m \sum_{h=1}^n \frac{M_{\max} - M_{jh}}{R} z_{jh} \quad (3)$$

1.3.2 时变路网分析 在时变路网的交通下,不同时间段内电动汽车的行驶速度不同,行驶速度的不同导致在相同路程下的配送时间难以计算,全天各时间段行驶速度函数为

$$v_{ij}(t) = \begin{cases} v_{ij1}; & t \in T_1 \\ v_{ij2}; & t \in T_2 \\ \dots \\ v_{iju}; & t \in T_u \end{cases} \quad (4)$$

### 1.4 模型建立

#### 1.4.1 配送成本计算

(1) 配送车辆的固定成本  $C_1$

在生鲜品的冷链物流配送过程中,配送车辆将会产生一定的固定成本,包括电动汽车电池的折旧成本、蓄冷箱的购买及损耗成本、车辆的折旧费、车辆派遣费、司机的驾驶费、装卸工人的工资等。

$$C_1 = nF \quad (5)$$

(2) 配送车辆的运输成本  $C_2$

车辆的运输成本,即车辆在物流配送过程中从一位顾客到下一位顾客途中所产生的费用.所产生的费用与车辆行驶的距离成正比。

$$C_2 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{h=1}^n B_{ijh} x_{ijh} d_{ij} \quad (6)$$

(3) 配送车辆在运输过程中所产生的货损成本  $C_3$

配送车辆在运输过程中会产生三部分的货损.第一部分是在车辆正常行驶过程中产生的货损;第二部分是配送车辆在服务顾客时,打开冷冻箱车门导致温度骤然升高使生鲜品的新鲜程度降低产生的货损;第三部分是电动汽车在其电量不满足到下一位顾客所需电量时要进行充电,在车辆充电过程中会造成生鲜品产生一定的货损。

$$C_3 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{h=1}^n P_1 y_{jh} (\omega_1 d_{ij} + \omega_2 t_{j1} + \omega_3 r_j) + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{h=1}^n P_2 y_{jh} (z_1 d_{ij} + z_2 t_{j2} + z_3 r_j) \quad (7)$$

(4) 配送时间窗的机会成本及惩罚成本  $C_4$

配送车辆要在一定的时间范围内进行配送,

以保证生鲜品的质量,在时间窗之前到达会产生部分机会成本,而在时间窗之后到达会产生部分惩罚成本。

$$C_4 = \alpha \sum_{j=0}^m \max(L_j - S_j, 0) + \beta \sum_{j=0}^m \max(S_j - T_j, 0) \quad (8)$$

(5) 配送车辆的制冷成本  $C_5$

配送车辆的蓄冷储存部分相当于一个大型的蓄冷箱,由大块的蓄冷板制造而成,并采用充电的方式进行蓄冷.蓄冷箱在运输过程中损失多少冷量,就相当于蓄冷箱在之前要储存多少冷量,而蓄冷需要消耗很多电,所谓的制冷成本也就是蓄冷箱蓄冷时所耗的电量。

$$C_5 = UEP_4 \quad (9)$$

$$U = (a_1 + a_2) \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{h=1}^n x_{ijh} t_{ij} + b_1 \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{h=1}^n y_{jh} t_{j1} + b_2 \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{h=1}^n y_{jh} t_{j2} \quad (10)$$

(6) 配送车辆的充电费用  $C_6$

配送车辆的剩余电量无法满足服务下一位顾客时,需要在运输途中采用快速充电模式进行充电,所耗的电费与充电时间成正比。

$$C_6 = rk \quad (11)$$

1.4.2 目标函数建立 建立目标函数如下:

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (12)$$

约束如下:

$$\sum_{h \in H} \sum_{i,j \in N} x_{ijh} = \sum_{h \in H} \sum_{i,j \in N} x_{jih} = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{i,j \in N} (e_1 + e_2 + e_3) x_{ijh} \leq q \quad (14)$$

$$L_j \leq S_j \leq T_j; \quad \forall j \in N \quad (15)$$

$$M_0 \leq M_{ih} \leq M_{\max}; \quad \forall i \in N \quad (16)$$

$$x_{ijh} \in \{0, 1\}; \quad \forall i, j \in N, h \in H \quad (17)$$

$$y_{jh} \in \{0, 1\}; \quad \forall j \in N, h \in H \quad (18)$$

$$z_{jh} \in \{0, 1\}; \quad \forall j \in N, h \in H \quad (19)$$

其中,式(13)表示每位顾客只接受一辆车服务;式(14)表示配送车辆的载重不得超过车辆的最大载重;式(15)表示顾客只接受在一定时间段内进行配送;式(16)表示电动汽车在每个节点的电量约束;式(17)~(19)为决策变量。

## 2 算法及求解过程

### 2.1 聚类过程

K-means 聚类是最经典、应用最广泛的聚类

分析方法,其目标是使类内距离尽可能最小,类间距离尽可能最大.本文采用  $K$ -means 聚类对“充电站及顾客节点”进行聚类,聚类数目为承担配送任务的电动汽车数目.由于本文内充电站及顾客节点均为坐标值,各属性间的量化标准相同,无须考虑加权问题.成本函数表示为类内距离平方和与类间距离平方和之比.

$$V = \frac{\sum_{1 \leq l \leq n} \sum_{j \in D} \sum_{i \in K} \theta_{lj} (K_{ji} - c_{li})^2}{\sum_{1 \leq l \leq n} \sum_{j \in D} \theta_{lj} (\bar{K}_i - c_{li})^2} \quad (20)$$

式中: $D$  表示待聚类对象的集合; $K_{ji}$  表示对象  $j$  第  $i$  维的值; $c_l$  表示离对象  $j$  最近的类中心; $c_{li}$  表示  $c_l$  第  $i$  维的值; $\theta_{lj}$  表示对象  $j$  是否属于类  $l$ ,是为 1,否则为 0.

传统  $K$ -means 聚类算法对初始聚类中心选取是随机的,如果选取不当会影响其迭代次数.因此本文采用密度网格的方式选取聚类中心<sup>[17]</sup>,改进后的  $K$ -means 聚类算法流程如下(见图 1):

**Step 1** 聚类数目初始化  $n = \gamma (\gamma = \min\{\text{车辆数, 未完成订单数}\})$ .

**Step 2** 初始化  $n$  个聚类中心.

**Step 2.1** 对  $K_i$  的每个维度  $i$  属于每个聚类集合,根据其取值范围求取  $s = \text{int}(\sqrt{n}) (\sqrt{n} - 1 < s \leq \sqrt{n})$ , $\text{int}(\cdot)$  表示下取整函数.

**Step 2.2** 在维度  $i$  上,在取值范围内  $f$  平分,得到  $f^i$  个网格.

**Step 2.3** 计算每个网格中数据点的个数,并将网格按数据点个数从大到小排列.

**Step 2.4** 取排序在前的  $n$  个网格,将点数记为  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ ,如果  $\delta_n = 0$ ,则  $f = \text{int}(f/2)$ ,重复 Step 2.2~Step 2.4;否则从网格中任取一点为代表点,则这  $n$  个代表点为初始中心.

**Step 3** 计算各节点到类中心距离,将每个对象赋予其最近的类.

**Step 4** 计算各类  $c_l$  的对象数  $|c_l| = \sum_{j \in D} \theta_{lj}$ ,如果  $\exists l \leq n$  使得  $|c_l| > \omega$ ,则保留离中心最近的  $\omega$  个对象,其他  $|c_l| - \omega$  个对象归于距离较近的类,如果较近的类中已达到  $\omega$  个对象,则转为第三近的类中,依此递推,同时调整对应的值.

**Step 5** 计算目标函数值,更新各类的中心.

**Step 6** 重复 Step 3~Step 5,连续两次目标

函数值相同,则输出.

根据对各节点的聚类分析,可以得出完成订单所需的车辆数、每辆车所需服务的顾客及电动汽车所需的充电站.

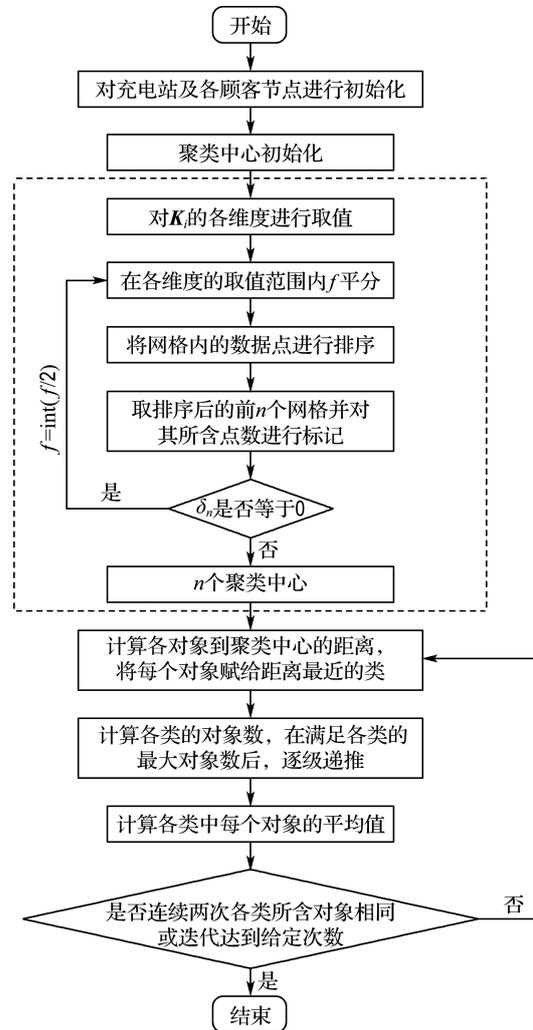


图 1 聚类流程图

Fig. 1 Clustering flow chart

## 2.2 算法设计

按照上文中的聚类方法,可以直接得出车辆与顾客及电动汽车充电站的直接配送关系,之后为每辆车寻找最优的配送方案.本文采用免疫遗传算法对车辆的最优配送方案进行优化.

(1) 抗原侵入及抗体编码:抗原侵入即目标函数及约束条件导入.在算法的运行过程中,不能对空间数据进行处理,需要对其进行编码处理.本文采用自然数编码方法,形成抗体编码.对  $m$  个顾客节点进行编码,抗体长度为  $\pi$ .

例:(i) $\pi=4$ ,抗体为(4,2,1,3),表示从配送

中心 0 出发,路线为 0-4-2-1-3-0,回到配送中心.

(ii) $\pi=5$ ,抗体为(3,1,5,2,4),表示从配送中心 0 出发,路线为 0-3-1-5-2-4-0,最后回到配送中心.

(iii) $\pi=7$ ,抗体为(6,2,4,1,5,3,7),表示从配送中心 0 出发,路线为 0-6-2-4-1-5-3-7-0,最后回到配送中心.

(2)初始抗体产生:随机产生初始抗体,并当记忆系统存在时从中产生初始群体.

(3)对所有抗体进行评估,用适应度函数逐个评价,形成父代群体.

(4)父代抗体在一定概率下进行交叉变异,以得到新的抗体群体.

(i)交叉:采用 OX 交叉操作.

例如:父代个体 A 为 123/456/789,B 为 987/654/321;将中间段作为交配区,将 A、B 的交配区进行交叉. A' 为 123/654/789,B' 为 987/456/321.

交叉操作在算法中起重要作用,交叉操作可以形成新的种群,并不断地保持种群个体的多样性.

(ii)变异:按照一定的概率进行突变,在父代染色体按突变概率进行突变,然后重新进行适应度评估,变异成功的会产生新的基因串加入新的子代中;变异失败的就会被淘汰.

(5)是否满足约束条件,若满足条件则输出,若不满足则重新进行迭代.

算法流程图如图 2 所示.

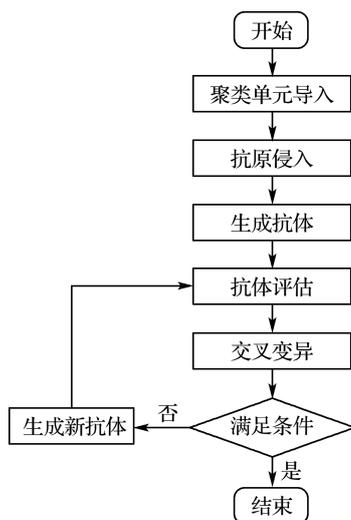


图 2 聚类单元内算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart in clustering unit

### 3 实验仿真

#### 3.1 求解参数及环境

本文采用 MATLAB 进行编码,为了研究方便,本文假设  $70 \times 70$  的网格为配送节点网格. 汽车的行驶时间按行驶路程与行驶速度之比进行计算,本文电动汽车行驶速度为 45 km/h. 本文求解参数中,重力加速度  $g$  为  $9.81 \text{ m/s}^2$ ,传动系统机械效率  $\eta$  为 1.46,汽车滚动阻力系数  $\epsilon$  为 0.015,空气阻力系数  $C_d$  为 0.6,汽车迎风面积  $A$  为  $6 \text{ m}^2$ ,电动汽车充电频率  $R$  为 4.5 kWh/min,电动汽车最大电池容量  $M_{\max}$  为 200 kWh. 车辆最大载重 4.5 t,裸车 2 t,电动汽车内部:冷冻区温度保持在  $-18 \sim -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;冷藏区温度保持在  $-3 \sim -5 \text{ }^\circ\text{C}$ (文中限定常温为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). 本文中种群设定为 100,最大进化代数为 200,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1.

#### 3.2 算例验证

以某生鲜品电商企业为例(本文数据从网站 <http://neumann.hec.ca/chairedistributive/data/>获取),要为 20 位顾客配送其所需要的货物,配送中心及顾客节点的位置见表 1,编号 1~20 代表顾客节点,编号 0 为物流配送中心,文中假设配送车辆可以在配送中心及顾客节点处充电(需向顾客支付一定费用),车辆总数为 4 辆,设定配送车辆工作时间为 6:00,每 30 min 为一个时间段,根据城市交通规律,7:00~9:00 为交通拥堵时间(车速为 30 km/h). 车辆的正常行驶速度为 45 km/h,在满足车辆不超载的约束条件下,合理安排路线. 在运输途中,保证所运输的货物不串味.

每位顾客在不同温层的需求量及装卸时间见表 2. 车辆的固定成本  $F=100$  元/车,单位运输成本  $B=2.5$  元/km;冷冻区生鲜品货物单价  $P_1=50$  元/t;冷藏区生鲜品货物单价  $P_2=100$  元/t;常温区生鲜品货物单价  $P_3=80$  元/t;运输过程及充电时冷冻区单位货损比例  $w_1=w_3=0.0015$ ;在开关门服务顾客时冷冻区单位货损比例  $w_2=0.025$ ;运输过程及充电时冷藏区单位货损比例  $z_1=z_3=0.001$ ;在开关门服务顾客时冷藏区单位货损比例  $z_2=0.002$ ;根据现实条件时间窗的机会成本  $\alpha=0$ ,惩罚成本  $\beta=4$  元/h;运输过程中冷冻区冷量损失  $a_1=0.002$ ;服务顾客时冷冻区冷量损失  $b_1=0.003$ ;运输过程中冷藏区冷量损失

表 1 坐标节点

Tab.1 Coordinate nodes

编号	坐标轴		时间窗
	X/km	Y/km	
0	35	35	6:00~16:00
1	41	49	8:00~12:00
2	35	17	7:00~9:00
3	55	45	8:00~10:00
4	55	20	7:00~10:00
5	15	30	8:00~10:30
6	25	30	8:00~11:00
7	20	50	6:30~9:30
8	10	43	7:30~10:00
9	55	60	6:30~9:40
10	30	60	7:30~12:00
11	20	65	7:30~11:40
12	50	35	7:00~10:00
13	30	25	8:00~10:00
14	15	10	6:40~9:40
15	30	5	8:00~11:00
16	10	20	8:00~10:00
17	5	30	7:30~10:00
18	20	40	7:00~9:00
19	15	60	8:00~10:20
20	45	65	7:30~11:30

表 2 顾客的需求量及装卸时间

Tab.2 Customer demand and handling time

编号	冷冻区		冷藏区		常温区	
	需求量/t	装卸时间/h	需求量/t	装卸时间/h	需求量/t	装卸时间/h
0	—	—	—	—	—	—
1	0.3	0.03	0.3	0.02	0.1	0.010
2	0.1	0.02	0.3	0.03	0.2	0.010
3	0.1	0.01	0.5	0.04	0.3	0.020
4	0.7	0.06	0.7	0.06	0.4	0.040
5	0.1	0.01	0.1	0.01	0.3	0.020
6	0.2	0.02	0.3	0.02	0.3	0.040
7	0.1	0.01	0.4	0.03	0.2	0.010
8	0.2	0.01	0.2	0.01	0.3	0.030
9	0.3	0.03	0.2	0.02	0.4	0.020
10	0.3	0.02	0.1	0.01	0.1	0.010
11	0.2	0.01	0.2	0.01	0.3	0.020
12	0.6	0.05	0.7	0.05	0.5	0.040
13	0.2	0.04	0.2	0.01	0.1	0.010
14	0.2	0.03	0.1	0.02	0.2	0.030
15	0.1	0.01	0.1	0.01	0.2	0.020
16	0.2	0.02	0.1	0.02	0.1	0.005
17	0.2	0.04	0.3	0.04	0.2	0.010
18	0.2	0.03	0.1	0.01	0.3	0.025
19	0.3	0.04	0.3	0.02	0.1	0.010
20	0.5	0.06	0.2	0.02	0.3	0.004

$a_2=0.0015$ ; 服务顾客时冷藏区冷量损失  $b_2=0.0025$ ; 蓄冷箱储存单位冷量所需电量  $E=2$ ; 单位电量所需的电价  $P_4=3$  元; 充电每小时电费  $k=1.5$  元。

通过程序进行实证分析, 借助 MATLAB 软件进行优化. 经过 MATLAB 迭代得出模型的最优配送路线, 见图 3 和表 3. 最终求出模型的最优成本为 1 651.45 元。

3.2.1 对比实验 1 为验证电动汽车多温共配改进方案是否合理有效, 将电动汽车和普通燃油汽车的常规运输方式与多温共配运输方式进行比较分析, 比较结果如表 4 所示。

根据表 4 的实验结果可知, 首先针对常规运输方式进行比较, 采用电动汽车进行运输其运输成本与燃油汽车运输成本的 1/4 相当, 极大地降低了运输成本, 与此同时采用电动汽车更加环保, 无碳排放的产生. 其次, 针对电动汽车的不同运输方式进行比较, 采用多温共配的运输方式,

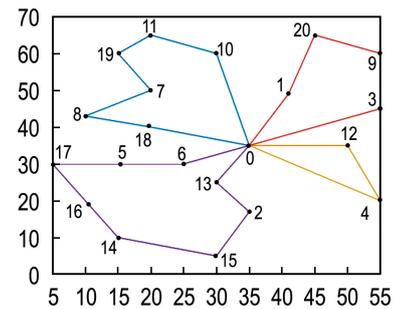


图 3 行驶路径

Fig.3 Driving route

其运输的总成本近似于常规运输方式的 1/3. 由以上结果分析可知, 以电动汽车为主要运输工具并采取多温共配的运输方式, 既可以极大程度地降低运输成本, 又可以节能减排, 是一种非常合理有效的运输方式。

3.2.2 对比实验 2 为验证免疫遗传算法的求解性能, 分别采用遗传算法、免疫遗传算法、粒子

表3 车辆路径优化结果  
Tab.3 Vehicle route optimization results

车辆序号	车辆路径	充电次数	车辆装载率	充电时间/h
1	0-18-8-7-19-11-10-0	1	0.87	0.57
2	0-1-20-9-3-0	1	0.78	0.48
3	0-4-12-0	0	0.80	0
4	0-13-2-15-14-16-17-5-6-0	1	0.89	0.72

表4 电动汽车与燃油汽车运输方案对比  
Tab.4 Comparison of electric vehicle and fuel vehicle transport schemes

运输方案	成本/元	碳排放/t
电动汽车常规运输方式	3 761.26	0
燃油汽车常规运输方式	14 799.55	51.25
电动汽车多温共配运输方式	1 293.82	0
燃油汽车多温共配运输方式	4 057.24	17.05

群算法和模拟退火算法对文中的电动汽车多温共配路径优化模型进行求解,并比较其求解情况,如表5所示。

表5 算法结果对比  
Tab.5 Comparison of algorithm results

迭代次数	成本/元			
	遗传算法	免疫遗传算法	粒子群算法	模拟退火算法
20	2 870.43	2 478.68	2 859.37	2 698.38
40	2 545.69	2 245.14	2 568.34	2 314.80
60	2 000.21	2 189.34	2 428.38	2 267.13
80	1 867.23	1 978.67	2 243.50	2 085.10
100	1 358.10	1 523.45	1 998.61	1 903.61
120	1 358.10	1 303.50	1 723.56	1 697.54
140	1 358.10	1 293.82	1 423.67	1 280.59
160	1 358.10	1 293.82	1 307.00	1 293.82
180	1 358.10	1 293.82	1 293.82	1 293.82
200	1 358.10	1 293.82	1 293.82	1 293.82

根据表5的实验结果可知:遗传算法经过100次迭代完成算法收敛,免疫遗传算法和粒子群算法分别经过140次迭代和180次迭代完成算法收敛,虽然遗传算法的收敛速度比免疫遗传算法的收敛速度快,但是从配送成本上看,遗传算法的结果略高于免疫遗传算法和粒子群算法的结果;粒子群算法与模拟退火算法分别经过180次

迭代和160次迭代完成算法收敛,可见免疫遗传算法的收敛速度高于粒子群算法和模拟退火算法的收敛速度.采用免疫遗传算法既可以避免遗传算法局部搜索能力差的缺点,还具有相对于粒子群算法和模拟退火算法较高的收敛速度。

## 4 结论

(1)本文针对不同温层生鲜品运输问题,提出了以电动汽车为主要运输工具的多温共配运输方式,充分考虑了时变路网及耗电性能与充电需求等实际情况,合理安排出发时间和路线,从而降低运输成本,合理避免车辆拥堵。

(2)本文所采用的电动汽车多温共配的运输方式是传统车辆路径优化的拓展类型,经过多种对比分析,从运输工具及运输方式上看,电动汽车多温共配是一种既节能减排又节约成本的运输方式。

(3)为了提高算法的求解性能,本文采用免疫遗传算法对电动汽车多温共配路径优化模型进行求解.根据实证分析,免疫遗传算法可以有效地避免出现局部搜索能力较差的现象,能够快速收敛得到求解结果,是求解电动汽车多温共配路径优化问题的一种有效算法。

(4)当前研究未考虑时变路网下电动汽车电池消耗、极端天气状况等问题,今后将进一步展开相关研究。

## 参考文献:

- [1] 张毅,朱攀. 电动出租车专用充电场站选址模型研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(5): 802-811.  
ZHANG Yi, ZHU Pan. Research on site selection model of special charging stations for taxis [J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(5): 802-811. (in Chinese)

- [2] 陈国平,董 昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考 [J]. 中国电机工程学报, 2020, **40**(17): 5493-5506.  
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, **40**(17): 5493-5506. (in Chinese)
- [3] 韩 飒. 考虑燃油消耗和排放的交叉口汽车路径规划与控制模型 [J]. 公路交通科技, 2019, **36**(10): 98-104.  
HAN Sa. A model of vehicle routing and control at intersection considering fuel consumption and emission [J]. **Journal of Highway and Transportation Research**, 2019, **36**(10): 98-104. (in Chinese)
- [4] 唐金环,戴守峰,姜力文,等. 顾客有限“碳行为”偏好对选址-路径-库存联合优化的影响 [J]. 中国管理科学, 2016, **24**(7): 110-119.  
TANG Jinhuan, JI Shoufeng, JIANG Liwen, *et al.* The effect of consumers bounded "carbon behavior" preference on location-routing-inventory optimization [J]. **Chinese Journal of Management Science**, 2016, **24**(7): 110-119. (in Chinese)
- [5] 戴守峰,唐金环,蓝海燕,等. 考虑选址-路径-库存联合优化的碳排放多目标模型与算法 [J]. 管理工程学报, 2016, **30**(3): 224-231.  
JI Shoufeng, TANG Jinhuan, LAN Haiyan, *et al.* Considering the location-routing-inventory joint optimization of carbon emissions multi objective model and algorithm [J]. **Journal of Industrial Engineering and Engineering Management**, 2016, **30**(3): 224-231. (in Chinese)
- [6] GUO Yinan, CHENG Jian, LUO Sha, *et al.* Robust dynamic multi-objective vehicle routing optimization method [J]. **IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics**, 2018, **15**(6): 1891-1903.
- [7] 鲁建厦,施贻贯,汤洪涛,等. 考虑碳排放的字母穿梭车密集仓储系统复合作业三维路径规划 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, **26**(3): 795-805.  
LU Jiansha, SHI Yiguan, TANG Hongtao, *et al.* Three-dimensional path planning of compound operation for shuttle combined vehicles intensive warehouse system considering carbon emissions [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2020, **26**(3): 795-805. (in Chinese)
- [8] 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 Ge, ZHANG Zhenlin. Status and development of electric vehicle routing optimization [J]. **Control and Decision**, 2018, **33**(10): 1729-1739. (in Chinese)
- [9] 邓友均,李 明,余 千,等. 基于实时信息感知的电动汽车物流配送路径优化与充电导航 [J]. 南方电网技术, 2017, **11**(2): 41-49.  
DENG Youjun, LI Ming, YU Qian, *et al.* Logistics distribution route optimization and charging navigation of electric vehicle based on real-time information sensing [J]. **Southern Power System Technology**, 2017, **11**(2): 41-49. (in Chinese)
- [10] 李 英,张鹏威,吴一帆. 电动汽车/传统汽车混合车队车辆配置及路径优化模型 [J]. 系统管理学报, 2020, **29**(3): 522-531.  
LI Ying, ZHANG Pengwei, WU Yifan. Vehicle routing problem with mixed fleet of conventional and electric vehicles [J]. **Journal of Systems and Management**, 2020, **29**(3): 522-531. (in Chinese)
- [11] 杨 珺,冯鹏祥,孙 昊,等. 电动汽车物流配送系统的换电站选址与路径优化问题研究 [J]. 中国管理科学, 2015, **23**(9): 87-96.  
YANG Jun, FENG Pengxiang, SUN Hao, *et al.* Battery exchange station location and vehicle routing problem in electric vehicles distribution system [J]. **Chinese Journal of Management Science**, 2015, **23**(9): 87-96. (in Chinese)
- [12] 周天沛,孙 伟. 基于充电设备利用率的电动汽车充电路径多目标优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, **47**(4): 115-123.  
ZHOU Tianpei, SUN Wei. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicles for charging route based on utilization rate of charging device [J]. **Power System Protection and Control**, 2019, **47**(4): 115-123. (in Chinese)
- [13] 郭 放,杨 珺,杨 超. 考虑充电策略与电池损耗的电动汽车路径优化问题研究 [J]. 中国管理科学, 2018, **26**(9): 106-118.  
GUO Fang, YANG Jun, YANG Chao. Study on the electric vehicle routing problem in the present of charging strategy and battery consumption [J]. **Chinese Journal of Management Science**, 2018, **26**(9): 106-118. (in Chinese)
- [14] 赵志学,李夏苗. 时变交通下生鲜配送电动车辆路径优化方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2020,

- 20(5): 218-225, 239.
- ZHAO Zhixue, LI Xiamiao. Electric vehicle route optimization for fresh logistics distribution based on time-varying traffic congestion [J]. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, 2020, 20(5): 218-225, 239. (in Chinese)
- [15] 肖建华, 王超文, 陈萍, 等. 基于城市道路限行的多能源多车型车辆路径优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(5): 1339-1348.
- XIAO Jianhua, WANG Chaowen, CHEN Ping, *et al.* The multi-energy heterogeneous fleet vehicle routing optimization under urban traffic restriction [J]. **System Engineering - Theory and Practice**, 2017, 37(5): 1339-1348. (in Chinese)
- [16] 陈玉光, 陈志祥. 基于准时送货和最小耗油的配送车辆路径问题研究 [J]. 中国管理科学, 2015, 23(S1): 156-164.
- CHEN Yuguang, CHEN Zhixiang. Study on the vehicle routing problem with objectives of on-time delivery and oil consumption minimization [J]. **Chinese Journal of Management Science**, 2015, 23(S1): 156-164. (in Chinese)
- [17] 李桃迎, 吕晓宁, 李峰, 等. 考虑动态需求的外卖配送路径优化模型及算法 [J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 406-413.
- LI Taoying, LV Xiaoning, LI Feng, *et al.* Routing optimization model and algorithm for takeout distribution with multiple fuzzy variables under dynamics demand [J]. **Control and Decision**, 2019, 34(2): 406-413. (in Chinese)

## Research of route planning for electric vehicle cold chain distribution under time-varying road network

WEN Tingxin<sup>\*1</sup>, LI Kexin<sup>1</sup>, ZHAO Linlin<sup>2</sup>, LI Ye<sup>1</sup>, ZHOU Tian<sup>1</sup>, HE Yan<sup>1</sup>

( 1. School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. School of Management Science and Engineering, Shandong Technology and Business University, Yantai 264005, China )

**Abstract:** In the context of dual carbon, electric vehicles have been rapidly popularized in the logistics industry. Under the constraints of freshness of fresh products, vehicle load limit and electric power limit of electric vehicles, the cost of electric vehicle charging process is included in the objective function, and a multi-temperature co-distribution route optimization model of electric vehicles with soft time window under time-varying road network is constructed. According to the characteristics of the model, *K*-means clustering is introduced to cluster customers, immune genetic algorithm is designed in the same clustering unit, and the heuristic path optimization scheme is obtained. The experimental results show that according to the needs of customers and the characteristics of time-varying road network, the transportation planning and distribution route is reasonably arranged to ensure the timeliness of fresh product transportation; The multi-temperature co-distribution transportation mode of electric vehicles makes the transportation cost cheaper and the process more energy-saving, and improves the economic effect of the enterprise.

**Key words:** electric vehicle; multi-temperature co-distribution; transportation of fresh products; *K*-means clustering; immune genetic algorithm