

模糊时间窗多目标冷链物流路径规划

李军涛 路梦梦 李都林 刘朋飞

(上海海洋大学 工程学院,上海 201306)

摘 要 针对近几年冷链物流行业高额的配送成本和能源消耗等问题,以冷链物流配送路径为研究对象,建立基于碳排放量、配送总成本和客户满意度的多目标配送路径优化模型。采用贴近实际的模糊时间窗配送方式和自适应灾变遗传算法,对冷链物流运输车辆路径规划和在实际配送中复杂路径问题下的多目标路径优化进行研究。算例分析表明:1)在冷链物流路径配送中,目标函数考虑碳排放时的碳排放量相比不考虑碳排放降低了56%;2)该模型能够在考虑碳排放量和客户满意度的基础上有效地降低配送成本,使多个目标进行有机统一,全局优化;3)该算法对于多目标冷链物流路径优化问题在寻优效率和计算时间上均优于标准遗传算法。

关键词 物流工程;多目标优化;自适应灾变遗传算法;路径规划;模糊时间窗

中图分类号 F542 **文章编号** 1007-4333(2019)12-0128-08 **文献标志码** A

Research on the logistics path planning of fuzzy time window multi-objective cold chain

LI Juntao, LU Mengmeng, LI Doulin, LIU Pengfei

(College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract Focusing on problems of high distribution costs and energy consumption of cold chain logistics industry, an optimization model for multi-objective distribution paths was established based on carbon emission, total distribution cost, and custom satisfaction in this study. By using distribution methods addressing fuzzy time window and adaptive catastrophe genetic algorithm, the path planning of the cold chain logistics vehicles and the multi-objective path optimization with complicated path choices during realistic distributions were investigated. The results showed that: 1) Comparing to ignoring carbon emission, the inclusion of carbon emission in the model reduced by 56% in the objective function; 2) Including carbon emissions and customer satisfaction, the model could obviously reduce the distribution costs and reach the global optimization while balancing multi-objectives effectively; 3) The proposed algorithm outperformed the traditional genetic algorithm for solving multi-objective cold chain logistics path optimization problem in terms of optimization search and calculation time.

Keywords logistics engineering; multi-objective optimization; adaptive catastrophe genetic algorithm; path optimization; fuzzy time window

冷链物流的快速发展给城市交通带来了很大的压力,而且物流配送企业的客户服务水平及资源利用率也是亟待解决的问题。在全世界倡导“低碳环保”的今天,绿色物流势在必行,而这些目标的实现与合理的冷链物流路径规划密不可分。如何实现绿色、高效、客户满意度高的冷链物流配送,对企业和社会而言都十分重要。

在已有相关研究中,大多是基于单目标路径的优化研究,如将车辆路径规划问题简化成 TSP 问题模型,并利用蚁群算法、粒子群算法进行求解,路径和成本不能很好的关联。部分研究将车辆配送总成本作为单一目标建立配送路径优化模型求解^[1-2]。

收稿日期:2019-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51408356);上海市教委重点项目(12ZZ167)

第一作者:李军涛,副教授,博士,主要从事制造系统、物流系统最优化研究,E-mail:jtli@shou.edu.cn

随着绿色物流的发展,碳排放转化为成本被考虑到物流配送总成本单目标中^[3-5],在一些赈灾物资的输送中,配送时间变成了比成本优化更重要的目标^[6]。然而在现实情况中,许多工程实际问题都是多目标优化的问题,单一目标只能对配送模型进行局部优化;同时多目标优化问题必须考虑配送产品的物理属性,如滞后冷链时间窗会直接导致食品品质的下降和变质。

鉴于绿色物流碳排放政策的制定,冷链食品品质保证的及时配送性以及成本的考虑,本研究将综合考虑冷链物流配送过程中的碳排放量、配送总成本和客户满意度3个因素构建多目标优化配送模型,采用模糊时间窗^[7]配送方式,运用自适应遗传算法对模型进行求解,以期为冷链物流企业的配送路径规划提供科学的参考和借鉴。

1 考虑模糊时间窗的多目标车辆路径规划模型

结合冷链物流的特性,碳排放量包含了车辆行驶产生的碳排放和制冷机组为维持车厢固定温度而产生的碳排放。在成本计算中,本研究综合考虑车辆的固定成本、运输成本、制冷成本、惩罚成本和货损成本之和作为配送总成本函数,使模型更加贴近实际配送。

1.1 多目标模型的建立

1.1.1 假设和约束

- 1) 配送中心能够满足所有配送点对农产品的需求,无缺货情况;
- 2) 配送需求为同一冷藏温度的农产品;
- 3) 每辆车农产品的装载量不得超过车辆最大载重量;
- 4) 每个配送点的位置和农产品需求量已知;
- 5) 每辆车可以服务多个配送点,但每个配送点仅可由一辆配送车进行服务;
- 6) 车辆按固定路径行驶,无突发问题及交通状况;
- 7) 各需求点之间的运输距离以最短路径距离计算;
- 8) 每辆车的起始点和终止点都是配送中心;
- 9) 每辆冷链物流车的燃油为汽油。

1.1.2 各目标函数的确定

- 1) 碳排放量。碳排放量 E 表达式为:

$$E = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \left(\epsilon \frac{\tau(\gamma NV_s + P_p/\eta) d_{ij}}{v} x_{ijk} + K d_{ij} q_i x_{ijk} \right) \quad (1)$$

式中: P_p 为车辆功率; γ 为发动机摩擦因子; N 为发动机转速; V_s 为发动机排量; η 为汽油发动机的效率参数; v 为车辆行驶平均速度; d_{ij} 为配送点 i 到配送点 j 之间的距离; ϵ 为碳排放系数; k 为车辆配送单位重量的货物行驶单位距离时由于制冷而产生的碳排放量; q_i 为客户 i 对农产品的需求量; n 为需要配送的配送点数量; m 为车辆使用数量; x_{ijk} 为决策变量, 定义为:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 由配送点 } i \text{ 行驶到配送点 } j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

约束条件如下:

① 配送中心车辆总数约束

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^n x_{ijk} \leq m, i = 0 \quad (2)$$

② 车辆的起始点和终止点约束

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = \sum_{j=1}^n x_{jik} \leq 1, i = 0, k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (3)$$

③ 每个客户配送车辆数量约束

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ijk} = y_{ik}, i \neq j, i = 1, 2, \dots, n, \forall k \quad (4)$$

④ 每车辆的载重量约束

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n q_i x_{ijk} \leq G \quad (5)$$

⑤ 配送车辆到达配送点的时间表达式

$$A_i = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijk} (t_{jk} + t_{ij} + t_{si}), i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

⑥ 车辆到达配送点的时间约束

$$A_i \leq l'_i \quad (7)$$

⑦ 模糊时间窗下服务开始的时间约束

$$A_i \leq t_{ik} \leq l'_i \quad (8)$$

式中: G 为配送车辆最大载重量; A_i 为配送车辆到达配送点的时间。

2) 车辆配送总成本。

① 车辆固定成本。车辆固定成本是指参与配送任务的车辆的折旧费、司机劳务费及租金等,不会因为客户数量和配送路程的改变而改变。固定成本 C_1 采用式(9)计算:

$$C_1 = b_1 m \quad (9)$$

式中: b_1 为每辆车每完成 1 次运输的固定成本。

② 车辆运输成本。车辆运输成本是车辆正常配送行驶时产生的成本, 主要指配送过程中的油耗成本, 与车辆的行驶距离呈正相关。运输成本 C_2 采用式(10)计算:

$$C_2 = b_2 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m d_{ij} x_{ijk} \quad (10)$$

式中: b_2 为车辆单位距离的运费。

③ 农产品货损成本。货损成本分为农产品运输途中由于时间累积导致货物腐败变质而产生的成本和装卸货物开启车门时车内温度变化导致货物腐败产生的成本。货损成本 C_3 采用式(11)计算:

$$C_3 = p \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m y_{ik} \cdot (q_i(1 - e^{-a_1(t_{ik} - t_{0k})}) + Q_m(1 - e^{-a_2 t_{si}})) \quad (11)$$

式中: p 为农产品的单位价值; a_1 为运输过程中的货损系数; a_2 为装卸货物时的货损系数, 且 $a_2 > a_1$; t_{ik} 为车辆 k 到达配送点 i 的时间; t_{0k} 为车辆 k 从配送中心出发的时间; t_{si} 为服务配送点 i 时所需要的时间; Q_m 为车辆服务完每个配送点时车上所剩农产品的质量; y_{ik} 为决策变量, 定义为:

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 为配送点 } i \text{ 服务} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

④ 能源消耗成本。本研究中的能源消耗成本综合考虑了车辆行驶过程中为维持车厢温度而产生的能源消耗成本和装卸货开车门时产生的能源消耗成本。能源消耗成本 C_4 采用式(12)计算:

$$C_4 = b_3 \left(\sum_{k=1}^m Q_{k1} (t_k - t_{0k}) \right) + b_3 \left(\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n Q_{k2} t_{si} y_{ik} \right) \quad (12)$$

式中: $Q_{k1} = RS(1 + \beta)(\theta_w - \theta_n)$; $Q_{k2} = f(0.54V_k + 3.22)(\theta_w - \theta_n)$; b_3 为单位制冷成本; Q_{k1} 为车辆 k 运输行驶热负荷; Q_{k2} 为车辆 k 在装卸货物时由于对流产生的热负荷; t_k 为车辆 k 完成配送任务回到配送中心的时间; β 为车厢破损程度; R 为传热率; S 为车厢传热面积; θ_w 为外界空气温度; θ_n 为农产品储藏温度; V_k 为车辆 k 冷藏箱体积; f 为开门附加热负荷系数。

⑤ 惩罚成本。模糊时间窗配送产生的惩罚成本函数如下:

$$G(t_i) = \begin{cases} Y & t_i < e'_i \\ g_1 \cdot \max((e_i - t_i), 0) & e'_i < t_i \leq e_i \\ 0 & t_i \in (e_i, l_i) \\ g_2 \cdot \max(0, (t_i - l_i)) & l'_i > t_i \geq l_i \\ Y & t_i > l'_i \end{cases} \quad (13)$$

式中: $[e_i, l_i]$ 为配送点要求时间窗; $[e'_i, l'_i]$ 为配送点最大容忍时间窗; Y 为无限大正数。惩罚成本 C_5 采用式(14)计算:

$$C_5 = g_1 \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \max(e_i - t_{ik}, 0) + g_2 \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \max(t_{ik} - l_i, 0) \quad (14)$$

式中: g_1 和 g_2 分别为配送时间在 $[e'_i, e_i]$ 和 $[l_i, l'_i]$ 内的惩罚因子。

由以上分析可得, 配送总成本目标函数为:

$$C = b_1 m + b_2 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m d_{ij} x_{ijk} + p \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m y_{ik} (q_i(1 - e^{-a_1(t_{ik} - t_{0k})}) + Q_m(1 - e^{-a_2 t_{si}})) + b_3 \left(\sum_{k=1}^m Q_{k1} (t_k - t_{0k}) \right) + b_3 \left(\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n Q_{k2} t_{si} y_{ik} \right) + g_1 \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \max(e_i - t_{ik}, 0) + g_2 \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \max(t_{ik} - l_i, 0) \quad (15)$$

约束条件同碳排放量函数约束条件(式(2)~(8))。

3) 客户满意度函数。

客户满意度用来评价配送商基于时间窗的服务水平, 其配送时间的长短对食品品质产生直接的影响。其线性函数 $f(t_i)$ 表达式为:

$$f(t_i) = \begin{cases} 0 & t_i < e'_i \\ \frac{e_i - t_i}{e_i - e'_i} & e'_i < t_i \leq e_i \\ 1 & t_i \in (e_i, l_i) \\ \frac{t_i - l_i}{l'_i - l_i} & l'_i > t_i \geq l_i \\ 0 & t_i > l'_i \end{cases} \quad (16)$$

为统一目标函数, 取客户不满意度, 用 $f'(t_i)$ 表示, 即

$$f'(t_i) = 1 - f(t_i) \quad (17)$$

1.2 去标量化和权重系数的确定

本研究采用模糊数学方法对各函数去标量化和模糊层次分析方法计算目标权重系数^[8], 从而将多

目标问题转化为具有权重和统一量纲的单目标问题。

由模糊数学方法得碳排放量伸缩指标 $l_1 = \max E - \min E$, 则其隶属度函数表示为:

$$p_1 = \frac{E - \min E}{l_1} \quad (18)$$

配送总成本伸缩指标 $l_2 = \max C - \min C$, 则其隶属度函数表示为:

$$p_2 = \frac{C - \min C}{l_2} \quad (19)$$

客户满意度函数的取值范围为 $[0, 1]$, 所以 $l_3 = 1$, 其隶属度函数为:

$$p_3 = \frac{\sum_{i=1}^n f'(t)}{n} \quad (20)$$

因此 3 个目标函数可以建立具有统一量纲的总目标函数式。同时, 因为各目标函数重要程度不同, 给定 1 组权重系数 $w_i (i=1, 2, 3)$ 用来衡量各目标函数的重要程度, 其中 $w_i > 0$ 且 $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$, 权重系数的精确度将直接影响目标函数的结果。通过专家打分得出本研究权重计算数据, 计算出的碳排放量、配送总成本和客户不满意度各指标权重为 $(w_1, w_2, w_3) = (0.21, 0.48, 0.31)$, 可见碳排放和客户满意的权重比例和配送成本的比例基本相当, 随着国家对碳排放的重视和冷链食品的高品质追求, 其权重会进一步提高。

1.3 模型与算法

1.3.1 目标模型的构建

总目标模型的构建公式为 $\min z$, $\min z = \sum_{i=1}^3 w_i p_i$ 。因此, 统一量纲后的目标函数为:

$$\min z = \frac{w_1 (E - \min E)}{l_1} + \frac{w_2 (C - \min C)}{l_2} + \frac{w_3 \sum_{i=1}^n f'(t)}{n} \quad (21)$$

约束条件与碳排放量函数和配送总成本函数约束一致(式(2)~(8))。

1.3.2 设计改进遗传算法

灾变自适应遗传算法的运算过程如下:

1) 染色体的编码方法。本研究采用自然数编码, 将 20 个客户点转化为 1~20 个数字排列构造成染色体, 在染色体中插入“0”来表示配送中心, 形成

从配送中心出发最后回到配送中心的完整配送路径。

2) 可行化过程的确定。由评价函数^[9]来确定客户点被服务的优先级关系从而确定染色体基因段, 在此基础上检测是否满足车辆最大载重和模糊时间窗的约束条件, 满足则为可行解, 否则为不可行解。然后, 采用惩罚函数方法, 将不可行解淘汰。

3) 选择。采用轮盘赌的选择策略, 选择出对环境适应能力强的个体。

4) 自适应。标准遗传算法中交叉概率和变异概率人为设定后在运算过程中是不变的, 这种操作方式因其盲目性和随机性具有一定局限, 可能会造成子代个体不如父代个体的情况发生, 并且不利于算法的并行化。为此本研究引用了自适应策略, 可以使算法中的交叉概率和变异概率根据种群适应度值自动调整, 使进化沿着有利于算法收敛的方向进行, 该算法能够跳出局部最优解, 克服标准遗传算法早熟的缺点。自适应策略公式^[10]为:

$$P_{ci}(t) = \begin{cases} P_{c1} + \frac{(P_{c0} - P_{c1})(f_{avg} - f_{min})}{f_{avg} - f_{min}} & f_{avg} > f_{min} \\ P_{c1} & f_{avg} \leq f_{min} \end{cases} \quad (22)$$

$$P_{mi}(t) = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m0} - P_{m1})(f_{avg} - f_{min})}{f_{avg} + f_{min}} & f_{avg} > f_{min} \\ P_{m1} & f_{avg} \leq f_{min} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{ci}(t)$ 和 $P_{mi}(t)$ 分别为第 t 次迭代时第 i 个个体的交叉和变异概率; P_{c1} 和 P_{m1} 分别为程序预设最低交叉和变异概率; P_{c0} 和 P_{m0} 分别为程序预设最高交叉和变异概率; f_{avg} 为当前种群平均适应度; f_{min} 为全局最佳适应度值。

5) 交叉。采用最大保留交叉方法, 在经过选择剩余的染色体中选中 2 个个体, 每个个体随机选择一段基因段 $[s_1, t_1]$ 和 $[s_2, t_2]$, 当达到交叉概率 P_c 时, 进行保留交叉操作, 保留交叉操作方法见图 1。交叉概率的计算公式为式(22)。

6) 变异。采用逆转变异操作, 在选择交叉后的最优解个体中随机选择 2 个基因位点, 当达到变异概率 P_m 时, 进行逆转变异操作, 逆转变异操作方法见图 2。染色体中的“0”无交换意义, 故规定在逆转变异操作中不同时选择“0”进行基因交换。变异概

率的计算公式为式(23)。

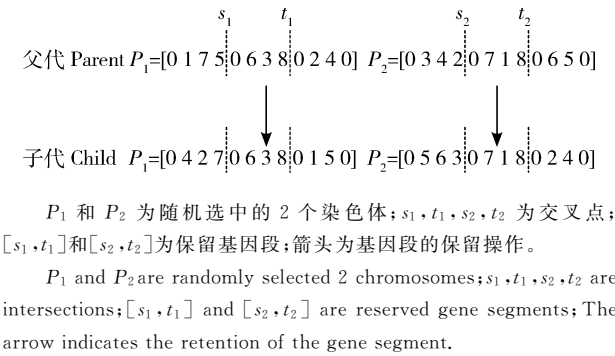
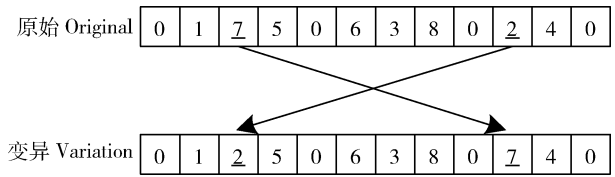


图1 最大保留交叉方法

Fig. 1 The maximum reserved intersection method



数字 2、7 为同一条染色体不同组内随机产生的 2 个基因码; 箭头表示选定的 2 个基因码交换。

The numbers 2 and 7 are two gene codes randomly generated in different groups of the same chromosome; The arrow indicates the exchange of the selected two gene codes.

图2 逆转变异操作方法

Fig. 2 The reverse transformation method

7) 灾变。灾变策略通过保留其中的最优个体, 使其他个体重新随机产生, 参与下一阶段的进化^[11], 以此让远离当前极值的个体有机会获得更充

分进化, 防止算法陷入局部最优解。

灾变的判定过程如下: 设 C_0 为初始设定值, 计数器从 0 开始计数, 当计数器值超过 C_0 时, 则认为局部搜索已经产生最优解, 进行灾变。若继续产生新的最优解时, 计数器则清零。为防止灾变时局部搜索不充分, 将设定值进行放大, 引入灾变系数 κ , 则灾变判定值 C 为:

$$C = \kappa \cdot \text{计数器数值} \tag{24}$$

当 C 小于初始设定值时, 重新计数; 当 C 大于初始设定值时, 则说明种群多样性变化很低, 以该值按照式(24)更新灾变判定值, 然后开始倒计数。

8) 终止条件。当满足最大迭代次数, 终止算法。

2 算例分析

2.1 已知条件

本研究以上海市浦东新区某配送中心为例, 主要针对周边 20 个配送点进行农产品冷链物流配送。根据上海市车辆限速规定, 在不考虑交通拥堵的情况下, 假定车辆以 40 km/h 的速度匀速行驶, 根据配送总量限定 4 辆车配送, 车辆固定成本 C_1 为 200 元, b_2 为 3 元/km。假设 θ_w 为上海夏季最高平均温度 38℃, θ_n 为 6℃, 车辆的单位制冷成本以 92 号汽油为例, 为 7.09 元/L, G 为 8 t。配送中心到各配送点的距离见表 1。各配送点的时间窗、所需服务时间及需求量如表 2。算法中参数设置如下: 初始种群 $M=20$, 迭代次数 100, 灾变概率 0.1, $P_{c0}=0.9$, $P_{c1}=0.6$, $P_{m0}=0.1$, $P_{m1}=0.01$ 。

表1 配送中心至配送点及各配送点间的最短距离

Table 1 The shortest distance between the distribution center and delivery points and delivery points km

配送点 Delivery point	0	1	2	3	4	...	17	18	19	20
0	0	1.6	2.6	2.7	2.8	...	3.9	4.0	4.1	4.3
1	1.6	0	3.8	1.3	4.3	...	2.5	5.6	5.3	5.5
2	2.6	3.8	0	4.3	1.5	...	5.0	3.4	1.6	1.7
3	2.7	1.3	4.3	0	5.1	...	1.3	6.6	5.7	5.8
4	2.8	4.3	1.5	5.1	0	...	6.1	1.8	1.9	2.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17	3.9	2.5	5.0	1.3	6.1	...	0	7.7	6.4	6.4
18	4.0	5.6	3.4	6.6	1.8	...	7.7	0	3.3	3.6
19	4.1	5.3	1.6	5.7	1.9	...	6.4	3.3	0	0.3
20	4.3	5.5	1.7	5.8	2.2	...	6.4	3.6	0.3	0

注: 数字 0 表示配送中心, 1~20 表示 20 个配送点。
Note: 0 indicates the distribution center. 1-20 indicate delivery points.

表 2 各配送点的时间窗、所需服务时间及需求量
Table 2 Time window, service time, and demand of each delivery point

配送点 Delivery points	要求时间窗 Demand time window	最大容忍时间窗 Maximum tolerance time window	服务时间/ min Service time	需求量/t Quantity required
0	5:30—17:00	5:00—17:30	0	—
1	6:00—8:30	5:30—9:00	15	1.5
2	7:30—9:00	7:00—9:30	23	2.3
3	6:00—8:00	5:30—8:30	12	1.2
4	6:30—8:30	6:00—9:00	15	1.5
5	6:40—9:30	6:10—10:00	18	1.8
6	7:00—9:50	6:30—10:20	10	1.0
7	7:30—9:00	7:00—9:30	22	0.5
8	7:30—9:30	7:00—10:00	05	2.2
9	7:10—9:00	6:40—9:30	20	2.0
10	7:00—9:10	6:30—9:40	15	1.5
11	7:30—10:00	7:00—10:30	5	0.5
12	7:30—9:30	7:00—10:00	5	0.5
13	7:30—10:00	7:00—10:30	13	1.3
14	7:30—9:30	7:00—10:00	15	1.5
15	6:50—9:00	6:20—9:30	5	0.5
16	7:10—9:00	6:40—9:30	5	0.5
17	7:10—9:00	6:40—9:30	15	1.5
18	7:30—9:30	7:00—10:00	13	1.3
19	6:30—9:00	6:00—9:30	21	2.1
20	7:30—9:30	7:00—10:00	14	1.4

2.2 运算结果与分析

本研究利用 MATLAB R2014a 自适应灾变遗传算法对多目标优化模型进行求解。经过运行程序对算例进行多次随机求解,选取的 1 组最优求解结果见表 3。可知,考虑碳排放与不考虑碳排放目标函数相比,在满意度相当的情况下,配送成本尽管提高了 0.5%,但碳排放量大幅减少达 56.038%。

以上模型求解是基于自适应灾变遗传算法求解

多目标模型优化问题,因此在相同控制参数、相同种群数目、染色体数和变异概率情况下,利用标准遗传算法针对考虑碳排放的模型进行求解,得到的最优结果见表 4。考虑碳排放模型的 2 种遗传算法总目标函数优化迭代曲线见图 3。可见,自适应灾变遗传算法在碳排放量、配送总成本和客户满意度求解结果上均优于标准遗传算法,对多目标优化模型能求解出更加理想的解。因此,本研究采用的自适应灾变遗传算法更具有效性。

表3 自适应灾变遗传算法2种模型的求解结果

Table 3 Results of two models based on adaptive catastrophic genetic algorithm

模型 Model	车辆 Vehicle	客户服务顺序 Customer service sequence	minz	碳排放量/kg Carbon emissions	配送总成本/元 Total distribution costs	客户满意度 Customer satisfaction
模型 1 Model 1	1	0-12-9-3-19-0	0.096	892.360	10 596.800	0.836
	2	0-5-16-1-6-15-20-0				
	3	0-8-18-11-7-10-14-0				
	4	0-13-4-17-2-0				
模型 2 Model2	1	0-8-10-3-1-0	0.098	392.300	10 650.200	0.828
	2	0-15-7-5-13-11-0				
	3	0-2-12-14-19-4-0				
	4	0-9-16-17-6-18-20-0				

注:模型1和模型2分别为不考虑碳排放和考虑碳排放的路径优化模型。
Note:Model 1 and Model 2 are the path optimization models excluding carbon emission and including carbon emission, respectively.

表4 考虑碳排放模型标准遗传算法的求解结果

Table 4 Results of standard genetic algorithm including carbon emission model

车辆 Vehicle	客户服务顺序 Customer service sequence	minz	碳排放量/kg Carbon emissions	配送总成本/元 Total distribution cost	客户满意度 Customer satisfaction
1	0-5-11-13-12-14-2-0	0.114	430.800	12 145.000	0.795
2	0-3-10-17-15-8-0				
3	0-9-16-18-6-7-1-0				
4	0-20-19-4-0				

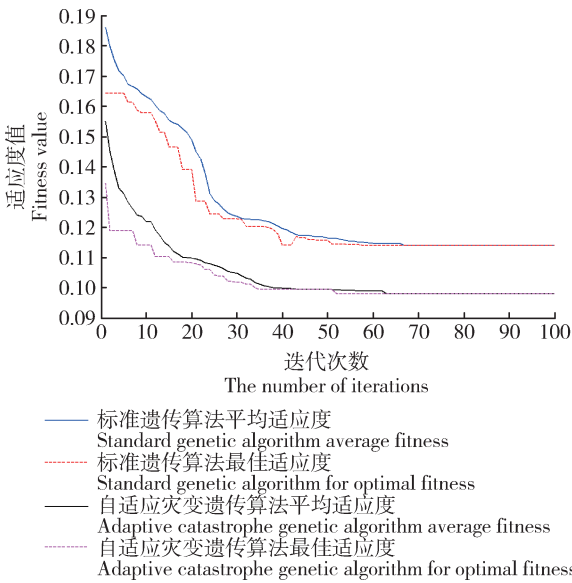


图3 总目标函数优化迭代曲线

Fig. 3 Optimization iteration curves of the final objective function

3 结 论

本研究针对冷链物流配送路径优化问题,构建了基于冷链物流车辆碳排放量、配送总成本和客户满意度的多目标优化模型,通过该模型的计算得到了3个目标函数的均衡最优解;该模型采用模糊时间窗配送模式,避免了软时间窗和硬时间窗冷链物流配送的短板;提出了1种改进遗传算法,算例计算结果表明,本算法在寻优能力和寻优效率上均较标准遗传算法有明显的改善,其最优解也优于标准遗传算法。

参考文献 References

[1] 康凯,韩杰,普玮,马艳芳.生鲜农产品冷链物流低碳配送路径优化研究[J].计算机工程与应用,2019,55(2):259-265
Kang K,Han J,Pu W,Ma Y F. Optimization research on cold chain distribution routes considering carbon emissions for fresh

- agricultural products[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(2): 259-265 (in Chinese)
- [2] 马向国, 刘同娟, 杨平哲, 蒋荣芬. 基于随机需求的冷链物流车辆路径优化模型[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(8): 1824-1832, 1840
Ma X G, Liu T J, Yang P Z, Jiang R F. Vehicle routing optimization model of cold chain logistics based on stochastic demand[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(8): 1824-1832, 1840 (in Chinese)
- [3] 鲍春玲, 张世斌. 考虑碳排放的冷链物流联合配送路径优化[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(5): 95-100, 107
Bao C L, Zhang S B. Route optimization of cold chain logistics in joint distribution: With consideration of carbon emission[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2018, 23(5): 95-100, 107 (in Chinese)
- [4] 潘茜茜, 干宏程. 考虑碳排放的冷链物流配送路径优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(2): 62-68
Pan X X, Gan H C. Study on cold chain logistics distribution path optimization of considering carbon emissions[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2016, 46(2): 62-68 (in Chinese)
- [5] 钟校, 张玉召, 任斌. 考虑碳排放的快捷货运方式选择模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 250-256
Zhong X, Zhang Y Z, Ren B. Selection model of express freight with the consideration of carbon emission [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(6): 250-256 (in Chinese)
- [6] 郭咏梅, 胡大伟, 陈翔. 改进蚁群算法求解带时间窗的应急物流开环车辆路径问题[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2017, 37(6): 105-112
Guo Y M, Hu D W, Chen X. Solution of emergency logistics open-loop vehicle routing problem with time window based on improved ant colony algorithm [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2017, 37(6): 105-112 (in Chinese)
- [7] 王旭坪, 张凯, 胡祥培. 基于模糊时间窗的车辆调度问题研究[J]. 管理工程学报, 2011, 25(3): 148-154
Wang X P, Zhang K, Hu X P. Research of vehicle routing problem based on fuzzy time window[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2011, 25(3): 148-154 (in Chinese)
- [8] 楼振凯. 带模糊时间窗的配送问题多目标优化研究[J]. 模糊系统与数学, 2017, 31(3): 183-190
Lou Z K. Study on multi-objective optimization of distribution problem with fuzzy time window [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2017, 31(3): 183-190 (in Chinese)
- [9] 曹倩, 邵举平, 孙延安. 基于改进遗传算法的生鲜农产品多目标配送路径优化[J]. 工业工程, 2015, 18(1): 71-76
Cao Q, Shao J P, Sun Y A. Multi-objective fresh agricultural product distribution path optimization based on improved genetic algorithm[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2015, 18(1): 71-76 (in Chinese)
- [10] 黄江波, 付志红. 基于自适应遗传算法函数优化与仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 28(5): 237-240
Huang J B, Fu Z H. Simulation and adaptive genetic algorithm used in function optimization[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(5): 237-240 (in Chinese)
- [11] 金希东, 李治. 遗传: 灾变算法及其在非线形控制系统中的应用[J]. 系统仿真学报, 1997, 9(2): 111-115
Jin X D, Li Z. Genetic catastrophic algorithms and its application in nonlinear control system[J]. *Journal of System Simulation*, 1997, 9(2): 111-115 (in Chinese)
- [12] 边展, 徐奇, 靳志宏. 带时间窗的甩挂运输路径优化问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(2): 183-193
Bian Z, Xu Q, Jin Z H. Optimization on the truck-trailer routing problem with time window constraints[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(2): 183-193 (in Chinese)
- [13] Liu S S, Sawik T, Papageorgiou L G. Multiobjective optimization of production, distribution and capacity planning of global supply chains in the process industry[J]. *Omega*, 2013, 41(2): 369-382
- [14] Zhuang Y, Zhao H, Zhang C. Multiobjective optimization for forward and reverse logistics network design in rural areas [C]. In: *Proceedings of 2016 IEEE 13th International Conference on e-Business Engineering (ICEBE)*. Macau: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2016: 316-321
- [15] Tang J, Pan Z, Fung R, Lau H. Vehicle routing problem with fuzzy time windows[J]. *Fuzzy Sets & Systems*, 2009, 160(5): 683-695
- [16] 王淑云, 孙虹, 牟进进. 随机需求下蓄冷式多温共配优化模型[J]. 系统管理学报, 2018, 27(4): 712-721
Wang S Y, Sun H, Mou J J. Optimization of cold-storage multi-temperature joint distribution based on stochastic demands[J]. *Journal of Systems & Management*, 2018, 27(4): 712-721 (in Chinese)
- [17] 冯杰, 史立. 生鲜产品的纯电动冷藏车配送路径问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(9): 237-242
Feng J, Shi L. Research on vehicle routing problem of fresh products with pure electric refrigerator truck [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(9): 237-242 (in Chinese)
- [18] 黄敏, 任亮, 王兴伟. 带有随机运输时间和成本的 4PL 路径优化问题[J]. 系统工程学报, 2019, 34(1): 82-90
Huang M, Ren L, Wang X W. Fourth party logistics routing optimization problem with stochastic transportation time and cost[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(1): 82-90 (in Chinese)
- [19] 任亮, 黄敏, 王兴伟. 考虑客户时间偏好的第四方物流路径优化问题[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(12): 3187-3196
Ren L, Huang M, Wang X W. Fourth party logistics routing optimization problem considering time preference of customer [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2018, 38(12): 3187-3196 (in Chinese)
- [20] 马昌喜, 何瑞春, 熊瑞琦. 基于双层规划的危险化学品配送路径鲁棒优化[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(5): 165-175
Ma C X, He R C, Xiong R Q. Robust optimization on distributing routes of hazardous materials based on bi-level programming[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(5): 165-175 (in Chinese)