



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



考虑时效性和品质性满意度约束的易腐品冷链物流配送

高浩然, 张玉林, 张顺顺

引用本文:

高浩然,张玉林,张顺顺. 考虑时效性和品质性满意度约束的易腐品冷链物流配送[J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1342–1350.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0998>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2504–2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

现货市场补充作用下基于总量折扣的运输服务采购问题研究

Transportation service procurement based on total discount under complementary effect of spot market

控制与决策. 2021, 36(11): 2794–2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0274>

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>

铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal

控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

考虑时效性和品质性满意度约束的易腐品冷链物流配送

高浩然, 张玉林[†], 张顺顺

(东南大学 经济管理学院, 南京 211189)

摘要: 针对易腐品冷链配送环节存在的成本高、碳排放量大、客户满意度低等问题,从易腐品配送的时效性和品质性两方面度量客户满意度,并以此为约束考虑配送过程中的固定成本、运输成本、货损成本、制冷成本、惩罚成本以及碳排放成本,构建以总成本最小为目标的易腐品冷链配送车辆路径优化模型,设计改进遗传算法求解优化模型,分析求解算法的复杂度.数值实验结果表明,所设计的求解算法总能获得总成本更低、产品新鲜度更高以及碳排放量更少的配送方案,同时表明改进的遗传算法相比于传统遗传算法在成本节约以及客户满意度提高方面具有一定优势,在一定程度上验证了所建模型的合理性及求解算法的有效性.

关键词: 客户满意度; 冷链物流; 车辆路径问题; 遗传算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0998

引用格式: 高浩然, 张玉林, 张顺顺. 考虑时效性和品质性满意度约束的易腐品冷链物流配送 [J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1342-1350.

Cold chain logistics distribution of perishable products considering timeliness and quality customer satisfaction

GAO Hao-ran, ZHANG Yu-lin[†], ZHANG Shun-shun

(School of Economics and Management, Southeastern University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Aiming at the problems of high cost, large carbon emissions and low customer satisfaction in the cold chain distribution of perishable goods, this paper measures customer satisfaction from the timeliness and quality of perishable goods distribution and takes this as a constraint. Considering the fixed cost, transportation cost, cargo damage cost, refrigeration cost, penalty cost and carbon emission cost in the distribution process, this paper constructs a vehicle routing optimization model of perishable goods cold chain distribution with the minimum total cost as the goal, designs an improved genetic algorithm to solve the optimization model, and analyzes the complexity of the algorithm. The results of numerical experiments show that the designed algorithm can always obtain a distribution plan with lower total cost, higher product freshness and less carbon emissions. They also show that the improved genetic algorithm has certain advantages in cost saving and customer satisfaction improvement compared with the traditional genetic algorithm, and also verify the rationality of the model and the effectiveness of the algorithm to some extent.

Keywords: customer satisfaction; cold chain logistics; vehicle routing problem; genetic algorithm

0 引言

近年来,随着经济社会的发展,居民生活水平不断改善,人们的饮食消费结构发生重大转变,对粮食等满足基本生活需要的需求量逐步下降,而对于水产品、瓜果及肉禽制品等生鲜冷链食品的需求量迅速上升.高品质生活的追求极大促进了我国冷链物流行业的发展,但生鲜食品对环境温度敏感性强,具有易腐烂变质、新鲜度难以长效保持等特性,必须进行冷链配送.同时,产品的送达时间会影响送达品的品

质,还会影响客户的购物体验^[1].目前,不少冷链物流企业的配送环节、冷藏车行驶路线安排不尽合理,这不仅增加路途运输成本,而且长时间的运输可能导致货损率的提高进而降低客户满意度.

冷链物流需要耗费大量能源维持车厢内的低温环境以保证产品品质,这将产生更多的二氧化碳排放,严重影响环境.相关数据表明^[2],在全球二氧化碳排放总量中,因运输配送产生的碳排放量的比例占到14%,而其中陆路运输的碳排放量占到70%.可见,如

收稿日期: 2022-06-07; 录用日期: 2023-01-03.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(72071040); 国家社会科学基金重大项目(21&ZD118).

责任编辑: 梁樑.

[†]通讯作者. E-mail: zhangyl@seu.edu.cn.

何减少运输过程中的碳排放、降低配送成本以及提高客户满意度是冷链物流企业取得竞争优势的关键,同时这也是冷链配送领域一直关注的研究方向。

鉴于此,本文以易腐品冷链配送环节的车辆调度问题为研究切入点,拟通过车辆路径的合理安排达到降低成本、减少碳排放以及提高客户满意度的目的。下面从易腐品冷链物流路径优化、绿色物流路径优化以及考虑客户满意度的路径优化等方面对相关成果进行简要综述。

1) 易腐品冷链物流路径优化。易腐品冷链物流路径优化是车辆路径优化问题(vehicle routing problem, VRP)的特殊形式,与车辆路径优化同样属于非确定性多项式难问题(NP-hard)。如何基于现实场景构建配送优化模型并设计高效求解的算法是学者们研究的重点。遗传算法是一种被广泛应用于求解车辆路径优化问题的启发式算法,具有良好的鲁棒性和全局搜索能力。缪小红等^[3]、Zhang等^[4]均采用改进遗传算法求解冷链配送路径优化问题,并认为产品新鲜度随时间呈指数变化。也有学者设计改进其他启发式算法进行求解,Chen等^[5]提出结合禁忌搜索算法的改进蚁群算法求解考虑品质劣变的生鲜农产品配送车辆路径问题,Amorim等^[6]通过易腐品配送的案例研究车队选址及车辆路径问题,采用自适应大邻域搜索算法求解。Zhang等^[7]在研究冷冻产品配送时认为产品品质随时间呈线性关系。

2) 绿色物流路径优化。

近年来,低碳绿色理念不断深入人心,许多学者开始关注环境问题,将其融入到车辆路径问题的研究中。Xiao等^[8]以包括油耗成本在内的总成本最小为目标,提出基于载重的油耗计算模型。Xu等^[9]提出基于速度和载重的油耗计算模型,并以最小化油耗量为优化目标。Ghannadpour等^[10]以油耗、车辆使用数最小以及客户满意度最大为优化目标,利用非支配排序遗传算法进行求解。Wang等^[11]在易腐品冷链配送的模型中考虑碳排放,探究了不同碳税对总成本和碳排放的影响。Zhang等^[12]研究了冷链物流企业的路径优化问题,发现可以在降低成本的同时减少碳排放。Li等^[13]在研究生鲜食品的冷链配送时,用改进的遗传算法实现了节能减排的目标。Qin等^[14]在冷链配送中引入碳交易机制计算碳成本。任腾等^[15]以包括固定成本、油耗成本、时间惩罚成本以及碳成本在内的总成本最小为目标建立模型。方文婷等^[16]将油耗成本与碳排放成本归结为与油耗量相关的绿色成

本,建立了节能减排的绿色冷链配送模型。

3) 考虑客户满意度的路径优化。

在车辆路径问题的研究中,许多学者认为影响客户满意度最重要的因素是配送及时性。Qin等^[14]在研究带硬时间窗的易腐品冷链配送问题时,认为车辆在时间窗之内送达,则客户满意,反之不满意。陈萍等^[17]利用到达客户的时间与时间窗的函数刻画客户满意度。余建军等^[18]考虑生鲜外卖的客户不会因提前到达而降低满意度,设计单边混合时间窗函数的刻画方法。Tang等^[19]以最大化客户满意度为目标建立模型,使用梯形模糊时间窗隶属函数,利用服务时间与指定时间窗的偏差刻画客户的满意度水平。Song等^[20]将客户满意度分为若干等级,建立了客户满意度与车辆送达时间的分段函数。Ghannadpour等^[10]将顾客分为重要和一般两部分,用硬时间窗计算重要客户的满意度,对于一般客户,则用软时间窗计算其满意度。

综上所述,在易腐品冷链配送的研究中,很多学者已经较为全面地考虑了经济、环境等各方面的成本,建立了以综合成本最小为目标的冷链配送模型。但现有研究在成本构成上考虑不够充分,同时已有文献主要从配送时效性度量客户满意度,但是在易腐品配送活动中,产品品质好坏也会影响客户满意度。因此,本文从易腐产品配送时效性和品质性两个方面度量客户的满意度,考虑配送过程中的车辆固定成本、运输成本、货损成本、制冷成本、惩罚成本以及碳排放成本,构建以总成本最小为目标、平均客户满意度为约束的易腐品冷链物流车辆路径优化模型,以期易腐品冷链物流企业的车辆配送路径决策提供支持。

1 问题与模型

1.1 问题描述

在网络图(如图1)中,存在一个供应商通过 k 辆冷藏车从同一个配送中心出发,向周边 n 个客户供应单种易腐品,客户的位置和需求量已知。配送中心需要规划合理的行车路线,要求车辆在满足最大载重、客户时间窗以及不同的客户满意度水平的情况下将

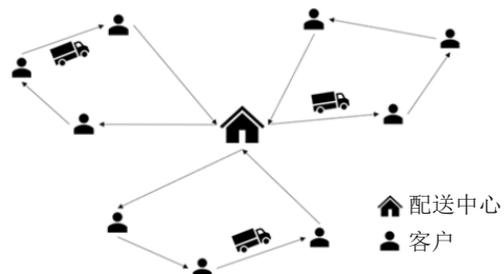


图1 冷链物流配送网络

货物配送给客户后再返回配送中心,使得配送过程中产生的包括固定成本、运输成本、货损成本、制冷成本、时间惩罚成本以及碳成本在内的综合成本最小。

1.2 模型构建

1.2.1 模型假设

本文模型有以下几点假设:

1) 配送中心有足够多的同质车辆,最大载重量已知,并且每条线路上客户的需求量总和不超过车辆最大载重。

2) 每一辆冷藏车都从配送中心出发,完成配送任务后必须返回配送中心。

3) 所有客户的需求必须得到满足,并且每个客户只能被访问一次。

4) 在配送过程中,车辆以恒定的速度行驶。

5) 在考虑温室气体造成的碳排放时,仅考虑CO₂一种气体。

1.2.2 符号描述

根据模型建立的需要,参数设置如下。

V : 配送中心和客户点集合, $V = \{0, 1, \dots, n\}$;

K : 冷藏车辆集合 $K = \{1, 2, \dots, K\}$;

E : 车辆行驶路径集合, $E = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$;

f_k : 车辆 k 的固定使用成本;

c_{ij}^k : 车辆 k 从客户点 i 行驶到 j 的单位距离成本;

q_i : 客户 i 的需求量;

p : 易腐产品的价格;

Q_{ij} : 车辆离开节点 i 时所载产品的重量;

α_1 : 车辆提前到达的惩罚成本;

α_2 : 车辆延时到达的惩罚成本;

d_{ij} : 节点 i 与节点 j 之间的欧氏距离;

t_i : 到达客户点 i 的时间;

bs_i : 车辆在客户 i 开始服务的时间;

ts_i : 车辆对客户 i 的服务时间;

ts'_i : 车辆在到达客户 i 之前对路径上其他客户的服务时间之和;

C_r : 车辆运输过程中单位时间所需的制冷成本;

C'_r : 车辆开门卸货服务的过程中单位时间所需的制冷成本;

f_t : 车辆配送过程中消耗的燃油总量;

μ : 行驶单位距离内,配送单位重量产品制冷设备产生的碳排放量;

c_0 : 单位碳排放量的价格;

ω : 碳排放系数;

ρ_0 : 车辆空载行驶时单位距离的油耗量;

ρ^* : 车辆满载行驶时单位距离的油耗量;

$[e_i, l_i]$: 客户期望被服务的时间窗;

$[E_i, L_i]$: 客户能接受的被服务的时间窗;

$[0, \delta_1]$: 客户预期的产品货损范围;

$[\delta_1, \delta_2]$: 客户可容忍的产品货损范围;

x_{ij}^k : 车辆 k 在路径 (i, j) 上行驶时取1,否则取0;

y_i^k : 客户 i 被车辆 k 服务时取1,否则取0。

1.2.3 成本函数分析

1) 固定成本。

冷藏中心在派出每辆卡车执行配送任务时,需要支付固定成本,包括购买或租赁冷藏车的费用、司机工资、车辆损耗等,通常被设定为固定值。假设冷藏中心派出 k 辆车执行配送任务,则固定成本 C_1 可表示为

$$C_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n x_{0i}^k f_k. \quad (1)$$

2) 运输成本。

运输成本与车辆油耗、维修所产生的费用有关,通常认为与车辆行驶里程成正比,故车辆的运输成本 C_2 可表示为

$$C_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=0}^n c_{ij}^k d_{ij} x_{ij}^k. \quad (2)$$

3) 货损成本。

易腐产品的新鲜度主要受温度、时间等因素的影响。本文引入文献[11]中刻画易腐产品的质量腐败函数 $D(t) = D_0 e^{-\theta t}$ 。其中: $D(t)$ 为产品在时刻 t 的新鲜度; t 为产品的运输时间; D_0 为产品从配送中心出发时的新鲜度,默认为1; θ 为产品的腐败率,其大小可视为恒定环境、温度下的常数。

由于配送过程中车厢内的温度与开门卸货时的温度不同,两种状态下产品的损耗速度也不同,本文从运输和卸货两个方面度量产品新鲜度。假设车辆配送过程中产品的腐败率为 θ_1 ,当打开车门卸货时,空气对流,车厢内温度升高,此时产品的腐败率也会发生变化,假设该腐败率为 θ_2 ($\theta_2 > \theta_1$),那么车辆从配送中心出发到达客户 i 并开始服务时产品的货损率 r_i 可表示为

$$r_i = 1 - e^{-\theta_1(bs_i - ts'_i) - \theta_2 ts_i}. \quad (3)$$

在计算配送过程中的货损成本时,由于易腐产品本身的特殊性,客户在购买此类产品时对产品货损程度存在心理预期,假设为 δ_1 。如果产品货损率在客户预期范围内,则不必支付货损成本;如果货损率超过了客户的预期,则企业要为超出的部分支付成本。因

此,货损成本 C_3 可表示为

$$C_3 = p \sum_{i=1}^n q_i \max(r_i - \delta_1, 0). \quad (4)$$

4) 制冷成本.

制冷成本包括车辆在运输过程中为保持低温而消耗的能源成本,以及在卸货过程中因车门打开、车厢内温度升高,制冷系统提供额外能量的成本.因此,运输过程中车辆的制冷成本 C_{41} 可表示为

$$C_{41} = C_r \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=0}^n x_{ij}^k \frac{d_{ij}}{v}. \quad (5)$$

卸货过程中车辆的制冷成本 C_{42} 可表示为

$$C_{42} = C'_r \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n y_i^k t s_i. \quad (6)$$

总的制冷成本 C_4 可表示为

$$C_4 = \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=0}^n \left(C_r x_{ij}^k \frac{d_{ij}}{v} + C'_r y_i^k t s_i \right). \quad (7)$$

5) 时间惩罚成本.

如果配送车辆没有在客户期望的时间窗内送达,造成产品腐坏,客户满意度降低,则将产生一定的惩罚成本,该成本与车辆到达时间和客户期望时间窗的偏离程度有关,故 C_5 可表示为

$$C_5 = \sum_{i=1}^n (\alpha_1 \max\{e_i - t_i, 0\} + \alpha_2 \max\{t_i - l_i, 0\}). \quad (8)$$

6) 碳排放成本.

本文研究碳排放时仅考虑 CO_2 一种气体.为了获取碳成本,需先计算出配送过程中的碳排放量,主要包括两个方面:汽车在行驶过程中消耗燃油所产生的碳排放以及制冷设备工作所产生的碳排放.

配送过程中消耗燃油所产生的碳计算为

$$\text{碳排放量} = \text{燃油消耗量} \times \text{碳排放系数}.$$

参考文献[8]车辆行驶单位距离油耗量的计算公式

$$\rho(x) = \rho_0 + (\rho^* - \rho_0) \frac{x}{Q}, \quad (9)$$

其中 x 为车辆的载重.由此计算出车辆行驶过程中的总油耗量 f_t ,有

$$f_t = \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=0}^n x_{ij}^k \rho(Q_{ij}) d_{ij}. \quad (10)$$

因油耗所产生的碳成本可以表示为

$$C_{61} = c_0 \omega f_t = c_0 \omega \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=0}^n x_{ij}^k \rho(Q_{ij}) d_{ij}. \quad (11)$$

制冷设备工作产生的碳受诸多因素影响,其中以

车辆载重和行驶距离为主^[11].制冷设备所产生的碳排放成本可以表示为

$$C_{62} = c_0 \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=0}^n \mu x_{ij}^k Q_{ij} d_{ij}. \quad (12)$$

由此得到整个配送过程中的碳排放成本 C_6 为

$$C_6 = c_0 \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=0}^n x_{ij}^k d_{ij} [\omega \rho(Q_{ij}) + \mu Q_{ij}]. \quad (13)$$

7) 客户满意度.

在时效性满意度方面,采用混合时间窗进行度量.客户对产品的时效性满意度 S_{i1} 与车辆到达时间 t_i 的函数关系表示为

$$S_{i1} = \begin{cases} \frac{t_i - E_i}{e_i - E_i}, & E_i \leq t_i < e_i; \\ 1, & e_i \leq t_i \leq l_i; \\ \frac{L_i - t_i}{L_i - l_i}, & l_i < t_i \leq L_i; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

在品质性满意度方面,利用易腐品的新鲜度损耗程度进行度量.客户对产品品质性的满意度 S_{i2} 和货损率 r_i 的函数关系表示为

$$S_{i2} = \begin{cases} 1, & 0 < r_i \leq \delta_1; \\ \frac{\delta_2 - r_i}{\delta_2 - \delta_1}, & \delta_1 < r_i \leq \delta_2; \\ 0, & r_i > \delta_2. \end{cases} \quad (15)$$

针对易腐品冷链物流模型,配送时效性和产品品质性是影响客户满意度的重要因素^[21],因此将时效性满意度与品质性满意度分别赋予权重相加得到客户的总体满意度 S_i ,表示为

$$S_i = \gamma_1 S_{i1} + \gamma_2 S_{i2}, \quad (16)$$

其中 γ_1 、 γ_2 为权重.文献[21]通过调查得知冷链企业对配送过程中各项成本的关注度不同,其中对于时效性的关注显著多于对其他成本的关注,因此本文将 γ_1 、 γ_2 分别设为0.7、0.3.

1.2.4 模型建立

综上所述,所研究的考虑客户满意度的易腐品冷链配送路径优化模型如下所示:

$$\min Z = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6. \quad (17)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \geq T; \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n x_{0i}^k \leq K, \forall k \in K, i \in V/\{0\}; \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n y_i^k = n; \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{0i}^k = \sum_{i=1}^n x_{i0}^k \leq 1, \forall k \in K; \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^k q_i \leq Q, \forall k \in K; \quad (22)$$

$$t_j = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n x_{ij}^k \left[\max(t_i, E_i) + ts_i + \frac{d_{ij}}{v} \right], \\ j \in V/\{0\}; \quad (23)$$

$$bs_j = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n x_{ij}^k \cdot \max\left(bs_i + ts_i + \frac{d_{ij}}{v}, E_j\right), \\ j \in V/\{0\}; \quad (24)$$

$$E_i \leq bs_i \leq L_i, \forall i \in V; \quad (25)$$

$$\sum_{k=1}^K y_i^k = 1, \forall i \in V/\{0\}. \quad (26)$$

其中:式(18)表示平均客户满意度约束;式(19)表示冷藏中心有足够多的车辆去完成配送任务;式(20)表示每一个客户都被服务到;式(21)表示每辆车从冷藏中心出发,最后返回冷藏中心;式(22)表示每辆车所服务客户的总需求量不得超过车辆的最大载重;式(23)表示车辆到达客户点的时间;式(24)表示车辆在客户点开始服务的时间;式(25)表示车辆开始服务的时间必须在客户可接受时间窗范围之内;式(26)表示每个顾客只被访问一次。

2 算法设计

本文采用遗传算法对模型进行求解,并针对遗传算法自身局部搜索能力的不足,在原有算子的基础上引入局部搜索操作,使得种群朝着目标函数最优的方向进化。

2.1 算法步骤

1) 染色体编码。

本文采用自然数编码方法对染色体进行编码。假设配送中心有3辆冷藏车服务5个客户,那么一种可行的染色体表达方式是1263475,其中6和7代表配送中心,将顾客划分为3段,即3条子路径。如果染色体的表达为1236745,则这条染色体表示两条配送路径。由此,当顾客数目为 n 且最大车辆使用数目为 K 时,染色体长度为 $n + K - 1$ 。

2) 初始解的生成与种群初始化。

较高质量的初始解能在一定程度上降低算法的搜索难度,加快收敛速度。本文采用如下方法生成较高质量的初始解。

step 1: 从客户中随机选择一个顾客 $j \in (1, 2, \dots, n)$, 生成客户序列 list : $(j, j + 1, \dots, n, 1, \dots, j - 1)$ 。

step 2: 初始使用车辆 $k = 1, i = 1$, 按照顺序遍历客户序列。

step 3: 将客户 list (i) 放入第 k 条路径中并判断是否满足载重约束, 如果满足则继续执行下一步, 否则转至 step 5。

step 4: 若当前路径为空, 则直接将 list (i) 放入路径中; 如果当前路径中只有一个客户, 则根据客户左时间窗的大小进行添加, 左时间窗小的客户先被访问; 如果当前路径有 m 个客户, 则客户之间有 $m - 1$ 个插入点, 遍历这些插入点, 确认客户 list (i) 的左时间窗能否在插入位置前后客户的左时间窗之间, 如果存在这样的插入点, 则将 list (i) 插入该位置, 如不存在则插入到路径末尾处。令 $i = i + 1$, 返回 step 3。

step 5: 如果第 k 条路径不满足载重量约束, 则先储存第 k 辆车在访问客户 list (i) 之前所访问的客户, 然后更新 $k = k + 1$, 返回 step 3。

直到遍历完所有的客户即可生成初始解, 在初始解形成的各条子路径之间用大于客户数 n 的自然数表示配送中心, 从而将各条子路径连接起来成为种群个体。重复上述方法生成一定规模的初始种群, 本文设置种群规模 $N = 100$ 。

3) 适应度函数。

种群中个体的适应度值越高, 表示个体的表现越好, 因为所设立的目标函数是求最小值, 所以将适应度函数取目标函数的倒数。

4) 选择操作。

采用轮盘赌的方式设置种群代沟率 $GGAP = 0.9$, 按照种群个体适应度值的大小选择 $90(N \times GGAP)$ 个个体进行后续的交叉、变异以及局部搜索操作。缺少的 10 个个体由上一代种群中适应度值最优的 10 个个体补齐, 这样做的好处是在进化的过程中不会丢失每一代种群中的最优个体。

5) 交叉操作。

交叉操作是在种群中选择个体按照一定的概率进行交叉, 通过重组或替换双亲中的某些基因形成新的个体。采用 OX 交叉方式, 在父代双亲 1 和 2 中随机选择两个交叉点 a 和 b 。 a 与 b 之间的基因段称为交叉片段。将父代 2 的交叉片段移动到父代 1 前, 将父代 1 的交叉片段移动到父代 2 前, 接着分别从前到后将第 2 个重复的基因删除便产生两个子代。交叉过程如图 2 所示。

6) 变异操作。

本文采用两点变异的方式, 即随机选取染色体上的两个变异点, 交换变异点基因位上的基因值得到变

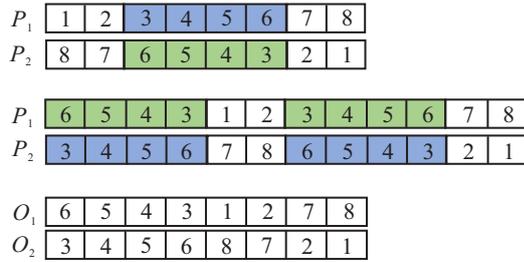


图2 交叉过程

异后的个体。

7) 局部搜索。

为了进一步提高算法的寻优能力,加入局部搜索操作。参考大邻域搜索算法中的“破坏”和“修复”思想,先利用破坏算子从当前解中随机地移出若干客户,再利用修复算子将被移出的客户重新插入到当前解中。重插入客户时遵循如下原则:在满足车辆载重约束和客户时间窗约束的情况下,尽可能将客户插回到使目标函数增加量最少的位置。

8) 终止条件。

终止条件是用于确定是否停止算法进化的标准。本文采用的终止条件是达到预先设定的进化代数,即当进化代数达到预先设定的最大值时算法终止,否则继续进化,直到达到预定的最大值。

2.2 算法复杂度分析

记 $m = |V| - 1$ 为客户点个数,针对带时间窗和载重约束的VRP问题,利用大邻域算法的“破坏”和“修复”思想,采用插入法将被移出的客户重新插入所生成的初始解中。对于当前生成的客户序列 $list : (j, j + 1, \dots, n, 1, \dots, j - 1)$, j 表示客户点,车辆遍历客户点,将客户点 j 插入第 k 条路径并计算是否满足载重约束和时间窗约束,生成满足条件的可行解,算法运行总次数为 $5m(m + 1)$ 。

对于已经生成的可行路径上的客户,计算其品质性满意度集合 S ,并计算每个客户点的满意度 S_j ,总的计算次数为 $m(1 + |S| \cdot |S_j|)$ 。与此同时,所有客户点的需求量之和必须满足车辆载重约束,对于可行路径,每辆车的实际载重量为 $\sum y_i^k q_i$,计算总次数为 $20 \sum_{i=1}^m q_i$ 。因此,算法的计算规模为

$$F(m) = 5m(m + 1) \cdot m(1 + |S| \cdot |S_j|) \cdot 20 \sum_i^m q_i,$$

满足

$$\lim_{m \rightarrow \infty, q_i \rightarrow \infty} \frac{F(m)}{f(m)} = c, c \neq 0.$$

则 $f(m) = m^5$,复杂度记为 $O(m^k)$ 。这表明所提出的求解算法是多项式时空开销的且可计算。

3 数值实验

3.1 参数设置

构造如下客户信息作为数值实验的算例。算例中有一个配送中心和20个客户,配送中心可使用车辆的最大数目为6。每个客户的位置、需求量、服务时间窗已知,如表1所示。

表1 客户信息

序号	x轴	y轴	需求量/t	$[e_i, l_i]$	$[E_i, L_i]$	t_{si}/min
0	20	40	0	5:30~17:00	5:30~17:30	0
1	41	49	1.5	6:00~8:00	5:30~9:00	20
2	35	17	0.5	7:30~9:00	7:00~9:30	10
3	55	45	1.5	6:00~8:00	5:30~8:30	20
4	55	20	1.5	6:30~8:20	6:00~9:00	20
5	15	30	2.0	6:40~8:30	6:10~10:00	25
6	25	30	2.0	7:00~9:00	6:30~10:20	25
7	20	50	1.8	7:20~9:00	7:00~9:30	22
8	10	43	1.0	7:30~9:00	7:00~10:00	15
9	55	60	1.0	7:00~8:30	6:40~9:30	15
10	30	60	1.0	7:00~9:00	6:30~9:40	15
11	20	65	1.0	7:30~9:30	7:00~10:30	15
12	50	35	0.5	7:30~9:00	7:00~10:00	10
13	30	25	0.5	7:30~9:30	7:00~10:30	10
14	15	10	1.5	7:30~9:00	7:00~10:00	20
15	30	5	2.0	6:50~8:30	6:20~9:30	25
16	10	20	1.5	7:00~8:40	6:40~9:30	20
17	5	30	1.5	7:00~8:40	6:40~9:30	20
18	35	35	0.5	7:50~9:00	7:00~10:00	10
19	15	60	2.5	6:30~8:30	6:00~9:30	30
20	45	65	1.0	7:50~9:00	7:70~10:10	15

综合参考其他文献,模型中各个参数值设置为:产品的腐败率 $\theta_1 = 0.002$ 、 $\theta_2 = 0.003$;易腐产品的价格为5000元/t;车辆运输过程中和开门卸货服务过程中产生的单位制冷成本 $C_r = 15$ 元/h、 $C'_r = 20$ 元/h;车辆提前或延迟到达的惩罚成本 $\alpha_1 = 40$ 元/h、 $\alpha_2 = 50$ 元/h;车辆空载或满载时的单位油耗量 $\rho_0 = 0.165$ L/km、 $\rho^* = 0.377$ L/km;碳排放系数 $\omega = 2.63$ kg/L;单位碳排放量的价格 $c_0 = 1$ 元/kg;行驶单位距离内配送单位重量产品制冷设备产生的碳排放量 $\mu = 0.0075$ g/(kg·km);客户可容忍的产品货损范围为[0.005, 0.020]。配送中心采用完全一样的车辆为客户进行配送服务,设定冷藏车在公路上的平均行驶速度为40km/h,最大载重量为8t,每辆车的固定使用成本为240元,单位里程运输成本为3元/km。此外,为简化计算,将客户点之间的距离表示为两点之间的欧氏距离,即

$$d_{ij} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

3.2 实验结果

1) 结果比较.

所设计遗传算法相关参数设置如下:种群规模为100,染色体长度为25,交叉概率为0.9,变异概率为0.05,最大迭代数为500.为了探究不同满意度水平下企业在易腐品配送环节所投入的各项成本,对平均客户满意度约束 T 设置3种不同的水平,分别为80%、85%和90%,每种情况的配送路线如图3所示.此外,将同时考虑时效性和品质性满意度模型(记为模型I)与仅考虑时效性满意度模型(记为模型II)的计算结果进行对比分析,如表2和表3所示.

由表2与表3比较来看,在同等客户满意度水平下,与模型I相比,模型II配送方案的总成本、货损成本和碳成本均高于模型I.并且实际的客户满意度也更低.可见,本文考虑客户满意度的方式不仅能够减少企业的成本投入,同时能够有效降低易腐品的货损率和减少配送过程中的碳排放,从而兼顾经济效益与环境效益.

从表3来看,随着满意度水平的提高,除时间惩罚成本略有下降,其他各项成本均有不同程度的增加,导致企业所投入的总成本不断扩大.因为满意度函数中时效性所占比重较大,模型优化时会以提高配送时效性为主.由于客户的时间窗各不相同,为了提高时效性需要调整客户配送顺序,使得配送距离增加(运输成本不断增加),延长配送时间,令模型I中与运输时间和距离相关的其他成本上升,最终导致总成本不断上升.

2) 满意度函数权重敏感性分析.

通过满意度函数中不同权重的赋值比较在不同满意度水平下目标函数值的变化情况,求解得出目标函数值如表4所示.

在本文针对易腐品客户设计的满意度函数中,无论时效性和品质性的权重 γ_1 、 γ_2 如何分配,3种满意度水平下取得的总成本总是低于传统满意度度量方

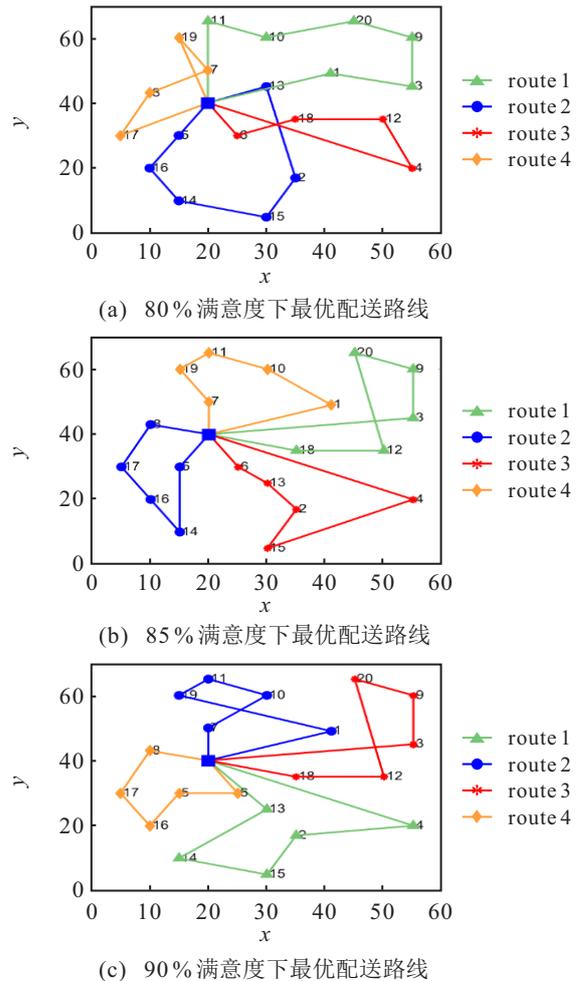


图3 不同满意度约束下的配送路线

式下的总成本,这表明所设计的客户满意度度量方式在成本节约上具有一定优势.当满意度水平约束较低时,目标函数值随权重的变化几乎无波动,敏感性较低;当满意度约束水平较高时,目标函数值随着产品品质性权重的逐步增大而呈现出总体下降的趋势,对于品质性权重较为敏感.当品质性权重 $\gamma_2 = 0.2$ 时,企业花费2770.34元的配送成本能达到80%的客户满意度;当 $\gamma_2 = 0.5$ 时,能达到85%的客户满意度;当 $\gamma_2 = 0.8$ 时,能达到90%的满意度.可见,当品质性权重较大时,企业能以更低的配送成本获得客户满意

表2 模型I同时从时效性和品质性度量客户满意度的结果

满意度约束	固定成本	运输成本	货损成本	制冷成本	时间惩罚成本	碳成本	总成本	实际满意度/%
$\geq 80\%$	960	1124.51	93.69	243.03	95.62	253.49	2770.34	83.99
$\geq 85\%$	960	1165.97	109.93	254.43	87.53	277.92	2855.78	87.24
$\geq 90\%$	960	1238.19	119.47	265.89	80.66	284.65	2948.86	90.97

表3 模型II仅从时效性度量客户满意度的结果

满意度约束	固定成本	运输成本	货损成本	制冷成本	时间惩罚成本	碳成本	总成本	实际满意度/%
$\geq 80\%$	960	1109.20	112.82	251.79	102.74	255.38	2791.93	83.21
$\geq 85\%$	960	1196.73	113.35	258.28	89.87	282.27	2900.50	85.08
$\geq 90\%$	960	1391.97	151.87	265.78	60.88	333.90	3164.40	90.65

表4 客户满意度函数权重敏感性分析

满意度权重 (S_{i1}, S_{i2})	$T \geq 80\%$	$T \geq 85\%$	$T \geq 90\%$
(0.9, 0.1)	2791.93	2855.94	3098.95
(0.8, 0.2)	2770.34	2842.48	2917.74
(0.7, 0.3)	2770.34	2855.78	2948.86
(0.6, 0.4)	2770.34	2793.72	2916.06
(0.5, 0.5)	2770.34	2770.34	2916.06
(0.4, 0.6)	2770.34	2770.34	2887.07
(0.3, 0.7)	2770.34	2770.34	2855.78
(0.2, 0.8)	2770.34	2770.34	2770.34
(0.1, 0.9)	2770.34	2770.34	2770.34
(1, 0)	2791.93	2900.50	3164.40

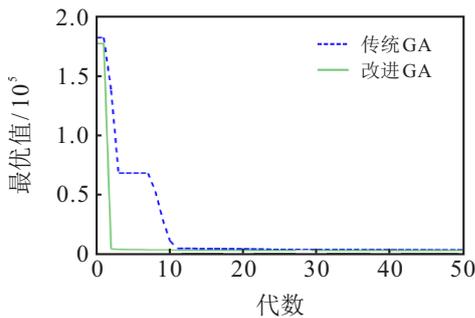
度更高的配送方案.

3) 算法比较.

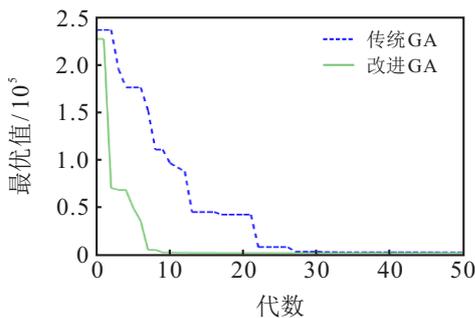
为了进一步验证本文改进遗传算法的有效性,运用传统遗传算法分别对3种客户满意度约束情况进行计算,模型其他参数保持不变,并与改进算法求解结果进行比较,如表5所示. 每种情况下两种算法前50代的收敛情况如图4所示. 由表5可以发现,改进的遗传算法求得的总成本在同等满意度水平约束下均少于传统遗传算法求得的总成本,实际的客户满意度也更高. 当满意度水平较高时,改进的遗传算法可以探寻到使用车辆数更少的配送方案,优势更加明显.

表5 算法结果比较

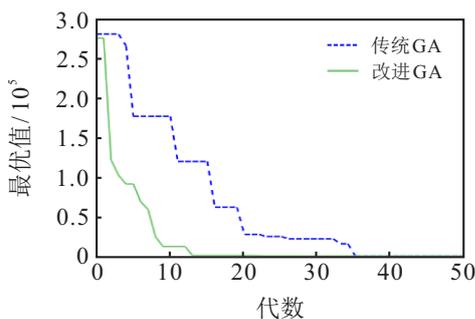
满意度约束	本文算法			GA		
	车辆数	总成本	实际满意度/%	车辆数	总成本	实际满意度/%
$\geq 80\%$	4	2770.34	83.99	4	2809.69	82.15
$\geq 85\%$	4	2855.78	87.24	4	2975.41	85.28
$\geq 90\%$	4	2948.86	90.97	5	3412.72	90.25



(a) 80% 满意度下的优化过程



(b) 85% 满意度下的优化过程



(c) 95% 满意度下的优化过程

图4 不同满意度约束下的算法优化过程

由图4可以看出,在同等满意度水平下,改进算法的初始解均优于传统遗传算法,迭代寻优时的收敛趋势也更显著,验证了本文改进算法的有效性.

4 结 论

本文聚焦易腐品冷链物流企业在冷链配送环节面临的如何通过合理规划车辆路径降低成本、减少碳排放以及保证客户满意度等问题,根据易腐品的特性,设计了更加符合易腐品配送业务场景的客户满意度计算方式,并以综合成本最小为目标、平均客户满意度为约束构建优化模型,设计改进的遗传算法对模型进行求解. 数值实验结果表明: 1) 与传统只从时效性度量客户满意度的方式相比,本文在满意度中加入品质性考量后,同等条件下能够得到总成本更低、产品新鲜度更高以及碳排放量更少的配送方案. 2) 配送成本对于产品品质性权重的敏感性较高,且不同权重下所提出的满意度度量方式总能获得更低的成本. 3) 改进算法相较于传统遗传算法在成本节约、客户满意度提高方面具有一定优势.

参考文献(References)

[1] 项辉宇, 薛真, 冷崇杰, 等. 基于 Halcon 的苹果品质视觉检测试验研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 123-126.
 (Xiang H Y, Xue Z, Leng C J, et al. Experimental study of apple quality vision detection based on Halcon[J]. Food & Machinery, 2016, 32(10): 123-126.)
 [2] 宁涛, 苟涛, 刘向东. 考虑低碳约束的生鲜农产品冷链物流策略仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(4):

- 797-805.
(Ning T, Gou T, Liu X D. Simulation on cold chain distribution path of fresh agricultural products under low-carbon constraints[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(4): 797-805.)
- [3] 缪小红, 周新年, 林森, 等. 第3方冷链物流配送路径优化研究[J]. 运筹与管理, 2011, 20(4): 32-38.
(Miao X H, Zhou X N, Lin S, et al. Study on routing optimization for cold-chain logistics distribution of 3PL[J]. Operations Research and Management Science, 2011, 20(4): 32-38.)
- [4] Zhang L Y, Gao Y, Sun Y S, et al. Application on cold chain logistics routing optimization based on improved genetic algorithm[J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2019, 53(2): 169-180.
- [5] Chen J, Gui P, Ding T, et al. Optimization of transportation routing problem for fresh food by improved ant colony algorithm based on tabu search[J]. Sustainability, 2019, 11(23): 6584-6606.
- [6] Amorim P, Parragh S N, Sperandio F, et al. A rich vehicle routing problem dealing with perishable food: A case study[J]. TOP, 2014, 22(2): 489-508.
- [7] Zhang Y, Chen X D. An optimization model for the vehicle routing problem in multi-product frozen food delivery[J]. Journal of Applied Research and Technology, 2014, 12(2): 239-250.
- [8] Xiao Y, Zhao Q, Kaku I, et al. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(7): 1419-1431.
- [9] Xu Z, Elomri A, Pokharel S, et al. A model for capacitated green vehicle routing problem with the time-varying vehicle speed and soft time windows[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 137: 106011.
- [10] Ghannadpour S F, Zarrabi A. Multi-objective heterogeneous vehicle routing and scheduling problem with energy minimizing[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 44: 728-747.
- [11] Wang S Y, Tao F M, Shi Y H, et al. Optimization of vehicle routing problem with time windows for cold chain logistics based on carbon tax[J]. Sustainability, 2017, 9(5): 694-717.
- [12] Zhang L Y, Tseng M L, Wang C H, et al. Low-carbon cold chain logistics using ribonucleic acid-ant colony optimization algorithm[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 169-180.
- [13] Li D L, Cao Q, Zuo M, et al. Optimization of green fresh food logistics with heterogeneous fleet vehicle route problem by improved genetic algorithm[J]. Sustainability, 2020, 12(5): 1946-1964.
- [14] Qin G Y, Tao F M, Li L X. A vehicle routing optimization problem for cold chain logistics considering customer satisfaction and carbon emissions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(4): 576-594.
- [15] 任腾, 罗天羽, 李姝萱, 等. 面向冷链物流配送路径优化的知识型蚁群算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 545-554.
(Ren T, Luo T Y, Li S X, et al. Knowledge based ant colony algorithm for cold chain logistics distribution path optimization[J]. Control and Decision, 2022, 37(3): 545-554.)
- [16] 方文婷, 艾时钟, 王晴, 等. 基于混合蚁群算法的冷链物流配送路径优化研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(11): 107-115.
(Fang W T, Ai S Z, Wang Q, et al. Research on cold chain logistics distribution path optimization based on hybrid ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(11): 107-115.)
- [17] 陈萍, 李航. 基于时间满意度的O2O外卖配送路径优化问题研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(S1): 170-176.
(Chen P, Li H. Optimization model and algorithm based on time satisfaction for O2O food delivery[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(S1): 170-176.)
- [18] 余建军, 程文琪, 吴永忠. 考虑顾客满意度的生鲜外卖路径规划[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(4): 158-167.
(Yu J J, Cheng W Q, Wu Y Z. Path planning of fresh takeout considering customer satisfaction[J]. Industrial Engineering and Management, 2021, 26(4): 158-167.)
- [19] Tang J, Pan Z, Fung R, et al. Vehicle routing problem with fuzzy time windows[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(5): 683-695.
- [20] Song M, Li J, Han Y, et al. Metaheuristics for solving the vehicle routing problem with the time windows and energy consumption in cold chain logistics[J]. Applied Soft Computing, 2020, 95: 106561.
- [21] 任腾, 陈玥, 向迎春, 等. 考虑客户满意度的低碳冷链车辆路径优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(4): 1108-1117.
(Ren T, Chen Y, Xiang Y C, et al. Optimization of low-carbon cold chain vehicle path considering customer satisfaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(4): 1108-1117.)
- [22] Wang M, Wang Y, Liu W, et al. How to achieve a win-win scenario between cost and customer satisfaction for cold chain logistics?[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 566: 125637.

作者简介

高浩然 (1997—), 男, 硕士生, 从事物流工程与管理的研究, E-mail: 734007052@qq.com;

张玉林 (1964—), 男, 教授, 博士, 从事收益管理、供应链管理研究, E-mail: zhangyl@seu.edu.cn;

张顺顺 (1996—), 男, 硕士生, 从事物流工程与管理的研究, E-mail: zhangshunshun1211@163.com.