

## 基于改进蚁群算法的低碳冷链配送路径优化

鲍惠芳, 方杰\*, 张进思, 王传胜

(皖西学院 电气与光电工程学院, 安徽 六安 237012)

**摘要:** 针对目前冷链配送路径优化中存在的综合配送成本考虑不全面的问题, 根据生鲜配送特点, 综合考虑基本运输成本、碳排放、制冷、货损以及时间窗约束, 建立以综合配送成本最小化为目标的路径优化模型。提出改进蚁群算法对该优化模型进行求解, 在初始阶段使用遗传算法生成初期信息素分布, 而后使用蚁群算法进行后续寻优搜索, 再引入模拟退火算法的Metropolis 准则筛选优质解。通过仿真实验验证了优化模型和改进算法的有效性, 对低碳可持续发展理念下生鲜品冷链配送路径优化问题研究具有一定意义, 助力冷链运输行业向低碳经济转型。

**关键词:** 冷链配送; 优化模型; 改进蚁群算法; 低碳

中图分类号: TP301

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2024)01-0183-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0963

引用格式: 鲍惠芳, 方杰, 张进思, 等. 基于改进蚁群算法的低碳冷链配送路径优化[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(1): 183-194.

**Reference format:** Bao Huifang, Fang Jie, Zhang Jinsi, et al. Optimization on Cold Chain Distribution Routes Considering Carbon Emissions Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 183-194.

### Optimization on Cold Chain Distribution Routes Considering Carbon Emissions Based on Improved Ant Colony Algorithm

Bao Huifang, Fang Jie\*, Zhang Jinsi, Wang Chuansheng

(School of Electrical and Photoelectric Engineering, West Anhui University, Luan 237012, China)

**Abstract:** As the comprehensive distribution cost is not considered comprehensively in the current cold chain distribution route optimization, this paper builds a path optimization model to minimize the comprehensive distribution cost. The model combines with the characteristics of fresh distribution, and comprehensively considers the transportation cost, carbon emission, refrigeration, cargo damage and time window constraints during cold chain transportation. Then, an improved ant colony algorithm is designed to solve this model. At the initial stage, the genetic algorithm is adopted to generate the initial pheromone, and then the ant colony algorithm is applied to conduct the subsequent optimization search. The Metropolis criterion of the simulated annealing algorithm is introduced to screen the high-quality solution. Finally, the effectiveness of the proposed optimization model and improved algorithm is verified by several experiments. The proposed model and improved algorithm have a certain significance for the research on the optimization of the cold chain distribution route of fresh food under the concept of low-carbon sustainable development. They helps the cold chain transportation industry to transition to low-carbon economy.

**Keywords:** cold chain distribution; optimization model; improved ant colony algorithm; low-carbon

收稿日期: 2022-08-15 修回日期: 2022-11-29

基金项目: 安徽省教育厅重点项目(2022AH051675); 皖西学院自然重点项目(WXZR202015); 皖西学院青年项目(WXZR202120)

第一作者: 鲍惠芳(1992-), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为自动控制与路径规划。E-mail: 1069484572@qq.com

通讯作者: 方杰(1978-), 男, 教授, 博士, 研究方向为信号处理、系统建模与仿真。E-mail: 63640193@qq.com

## 0 引言

“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”<sup>[1]</sup>的提出使得高碳行业面临更强的碳排放约束，加大技术改造和科技创新向低碳经济转型是高碳排放行业的必经之路。生鲜品冷链物流是物流运输业的一个重要分支，由于配送过程中产生的能耗与碳排放远超普通物流，使其成为物流行业中高耗能、高碳排放的业务<sup>[2]</sup>，自然也是双碳目标下迫切需要重点攻关的领域。因此，如何借助新技术、新理念、新模式加速实现冷链物流运输过程中的节能减排，实现经济和环境可持续发展的双赢局面是一个亟待解决的社会问题，也是冷链物流研究的热点问题。

生鲜品冷链配送路径优化问题<sup>[3]</sup>实际可归结为车辆路径问题(vehicle routing problem,VRP)，该问题自 1959 年提出以来，一直是研究的热点问题。从研究内容来看，学者们主要从模型和算法这两个角度对 VRP 问题进行专研。从模型角度分析，从最初的单目标、单车场、少约束、静态规划模型逐步发展到现如今的多目标<sup>[4]</sup>、多车场<sup>[5]</sup>、多约束、动态规划模型，难度和复杂程度不断提高，并且与实际应用也愈来愈靠近。与此同时，学者们也从传统精确算法转向采用启发式算法<sup>[6-8]</sup>来解决此类复杂问题。

## 1 研究现状

本文主要研究生鲜品冷链配送路径优化问题，近年来很多研究学者从不同的角度对该问题展开研究。Yong 等<sup>[9]</sup>考虑客户满意度提出带软时间窗的生鲜配送路径优化模型；魏炜<sup>[10]</sup>充分考虑生鲜品新鲜度，从准时性、货损最小化角度出发，构建物流配送模型；杨海兰<sup>[11]</sup>在传统配送成本最小化的基础上，考虑客户总价值和满意度最大化，构建多目标冷链配送路径优化模型；康凯等<sup>[12]</sup>从

绿色配送角度出发，引入碳税机制，将碳排放成本纳入目标函数，构建生鲜农产品路径优化模型。



从目前研究成果来看, 虽然取得了一定进展, 但是仍存在一些问题, 例如针对冷链运输综合配送成本考虑不全面, 学者们通常以生鲜度、客户满意度、车辆运输成本最低等一个或多个作为优化目标, 虽然一些学者将碳排放成本作为目标函数的一部分, 但是大部分只考虑燃油消耗产生的碳排放成本, 而忽略制冷剂也会产生碳排放。实际上由于冷链运输的特殊性, 其综合配送成本不仅仅由车辆运输成本、用以表征客户满意度的违反时间窗约束的惩罚成本、用以表征货品生鲜度的货损成本构成, 还应包括制冷设备产生的制冷成本以及燃油消耗和制冷剂产生的碳排放成本, 这些都是冷链运输过程中必然会产生成本, 是不可忽略的, 必须综合考虑, 这样才能更贴近实际情况。

本文结合冷链运输的特点, 针对目前冷链配送路径优化问题中存在的综合配送成本考虑不全面的问题, 提出综合考虑车辆运输成本、碳排放成本、违反时间窗约束的惩罚成本、制冷成本和

货损成本, 建立车辆路径优化模型。鉴于本文提出的优化模型复杂度高、难度大属于 NP 难题, 采用传统启发式算法很难得出问题的较好解, 为此提出使用基于遗传-模拟退火的改进蚁群算法进行求解。

## 2 模型建立

### 2.1 问题描述

生鲜配送是指配送中心综合考虑客户需求采用科学手段以配送成本最小化为目标合理规划配送路线, 所有配送车辆从配送中心出发, 按照客户需求保质保量、按时高效地将生鲜产品运送到目的地, 最后返回配送中心。为了确保本文中模型构建的完整性, 做出以下几点前提假设:

(1) 配送中心可调遣车辆的数目是已知的, 每辆车的载重限制、行驶速度已知且相同;

(2) 本文仅考虑单配送中心、多客户点的单向生鲜配送情形;

<http://www.china-simulation.com>

(3) 所有客户的需求类型均为送货类型, 各客户的需求量已知, 且单笔订单的需求量不能大于配送车辆最大载运量;

(4) 车辆起止点均为配送中心;

(5) 各客户点都必须被服务且仅被服务一次;

(6) 所有客户与配送中心、客户与客户之间均是连通的, 其间的道路均为双向可行驶道路。

车辆运输成本分为两部分, 一部分是车辆的固定费用, 一部分是车辆行驶过程中产生的运行费用。

1) 固定费用

固定费用与配送中心派遣的车辆总数密切相关

## 2.2 参数符号与变量定义

本文各变量参数符号定义如下:

$N$ : 生鲜配送中心和客户点集合;

$i$ : 客户编号,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 配送中心编号为 0;

$q_i$ : 客户  $i$  的需求量;

$k$ : 车辆编号,  $k = 1, 2, \dots, m$ , 生鲜配送中心的车辆总数为  $m$ ;

$Q_k$ : 第  $k$  辆车的额定载重量;

$t_{ik}$ : 配送车辆  $k$  到达客户  $i$  的时间;

$t_{0k}$ : 配送车辆  $k$  离开配送中心的时间;

$s_{ik}$ : 配送车辆  $k$  在客户点  $i$  的服务时间;

$N_k$ : 车辆  $k$  服务的客户总数;

$t_{ij}$ : 客户点  $i$  到  $j$  的运输时间;

$d_{ij}$ : 客户点  $i$  与  $j$  之间的距离;

$et_i$ : 客户  $i$  容许被服务的最早时间;

$lt_i$ : 客户  $i$  容许被服务的最迟时间;

$p_t$ : 时间窗惩罚函数的系数, 为一常数值;

$x_{ijk}$ : 当配送车辆从客户点  $i$  处行驶到  $j$  处时,  $x_{ijk} = 1$ , 否则,  $x_{ijk} = 0$ ;

$y_{ik}$ : 当客户点  $i$  处的配送任务由车辆  $k$  完成时,  $y_{ik} = 1$ , 否则,  $y_{ik} = 0$ 。

## 2.3 目标函数

(1) 车辆运输成本



关, 派遣的车辆越多, 产生的固定费用越高。每辆车的租赁费或是购置费都是不菲的, 而且一旦投入使用, 车辆本身也会产生损耗, 这部分费用分摊到车辆启动费中, 另外, 要为每辆派遣车辆安排一位司机送货, 车辆启动费和司机的劳务费共同组成车辆的固定费用, 车辆固定费用为

$$A \sum_{k=1}^m \text{sign}(N_k) \quad (1)$$

$$\text{sign}(N_k) = \begin{cases} 1, & N_k = 1, 2, \dots, n \\ 0, & N_k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)表示车辆 $k$ 是否派遣, 一旦车辆 $k$ 被派遣就会产生一个固定费用。 $N_k$ 表示此次配送中车辆 $k$ 总共服务的客户数量。

## 2) 运行费用

运行费用由车辆在一次配送过程中因正常行驶产生油耗费用来决定, 它与车辆行驶里程和车辆载重呈正相关, 这是一笔很大的费用支出, 因此, 为了降低运行成本尽可能在众多可行的配送方案中选择使得总路径长度最短的一条。

设冷链车辆最大载重为 $Q$ , 满载时每单位距离燃油消耗量为 $c^*$ , 空载时为 $c^0$ 。则当载重为 $Q_m$ (配送车辆离开客户 $i$ 时所剩的产品重量)时, 每单位距离燃油消耗量计算公式为

$$c(Q_m) = \frac{c^* - c^0}{Q} Q_m + c^0 \quad (3)$$

则从客户点 $i$ 到客户点 $j$ (两点间的距离为 $d_{ij}$ )所产生的燃油消耗量为 $d_{ij}c(Q_m)$ 。因此, 设油耗费用按照 $B$ 元/升计算, 在整个运输过程中车辆运行费用的表达式为

$$B \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ijk} d_{ij} c(Q_m) \quad (4)$$

综上所述, 车辆运输成本的表达式为

$$WTC = A \sum_{k=1}^m \text{sign}(N_k) + B \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ijk} d_{ij} c(Q_m) \quad (5)$$

## (2) 违反时间窗约束的惩罚成本

时间窗是指时间段 $[et_i, lt_i]$ , 它是由顾客接受的最早配送时间 $et_i$ 和最晚配送时间 $lt_i$ 组成。按照客户对配送车辆违反时间窗约束的接受程度, 可



将其划分为以下 3 种类型：硬时间窗、软时间窗以及混合型时间窗<sup>[13]</sup>。本文结合生鲜配送的实际情况设计了如图 1 所示的混合型时间窗约束函数，其惩罚成本是一个关于服务时间的分段函数，以表征客户对此次服务的满意程度。

与普通VRP不同，生鲜配送需要考虑因货品保鲜而产生的制冷费用。制冷费用主要包括车辆在运输和卸载两阶段开启制冷装置所消耗的能源

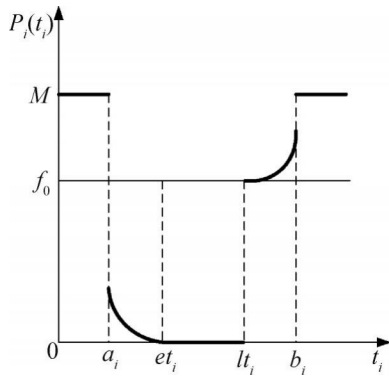


图 1 改进的混合型时间窗函数

Fig. 1 Function of improved hybrid time window

图 1 中， $[et_i, lt_i]$  为可接受配送时间区间； $[a_i, et_i]$  之间到达的货物表示早到，当货物早到时，有可能出现仓库没有空间或接货人员不在现场，造成一定的损失，但不会太大，所以给予一点小的惩罚； $[lt_i, b_i]$  之间到达的货物表示迟到，这时可能出现客户已经从其他供应商那里买到货物，造成较大的机会成本损失，所以除了要承担部分固定惩罚成本  $f_0$  外，还要承担与时间呈二次函数形式增加的可变惩罚成本； $[0, a_i]$  或  $[b_i, +\infty)$  之间到达的货物表示已超出最多容许的早到或迟到时间，此期间到达的货物将被拒绝，这里用极大值  $M$  表示拒绝货物。综上所述，本文中违反时间窗约束的惩罚成本计算公式可表示为

$$P_i(t_i) = \begin{cases} M, & t_i \leq a_i \\ p_i(t_i - et_i)^2, & a_i < t_i \leq et_i \\ 0, & et_i < t_i \leq lt_i \\ f_0 + p_i(t_i - lt_i)^2, & lt_i < t_i \leq b_i \\ M, & t_i > b_i \end{cases} \quad (6)$$

(3) 制冷成本



成本，其实从全面的角度还应包括制冷剂的消耗费用，但由于这部分费用很少，忽略不计。

在运输过程中，冷藏货车因制冷产生的油耗可看成与车辆行驶时间近似成正比，且当车辆服务完最后一位客户时，车厢已空，所以制冷装置无需开启。因此，制冷成本 $P(R)_1$ 为

$$P(R)_1 = B \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n l_1 x_{ijk} t_{ij} \quad (7)$$

式中： $l_1$ 为在运输过程中单位时间制冷产生的油耗。

在卸货过程中，由于车门敞开，为保证货品保鲜度制冷装置全程开放，产生油耗较大，可看成与卸货时长近似成正比，则制冷成本 $P(R)_2$ 为

$$P(R)_2 = B \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n l_2 y_{ik} s_{ik} \quad (8)$$

式中： $l_2$ 为在卸货过程中单位时间制冷产生的油耗。

因此，总的制冷成本为

$$P(R) = P(R)_1 + P(R)_2 = B \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n l_1 x_{ijk} t_{ij} +$$

$$B \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n l_2 y_{ik} s_{ik} \quad (9)$$

#### (4) 货损成本

冷链运输过程中由于生鲜产品具有易腐性，因此会受到储存环境中的温度、湿度、氧气浓度等因素的影响，并随着时间推移产生一定损耗。

在运输过程中，配送车辆从配送中心出发驶向顾客 $i$ ，产生的货损成本 $P(D)_1$ 为

$$P(D)_1 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n y_{ik} P q_i (1 - e^{-\varepsilon_1 (t_k - t_{0k})}) \quad (10)$$

式中： $P$ 为生鲜产品的单位价值； $\varepsilon_1$ 为在运输途中产品的腐败率。

在卸货过程中，由于车门敞开，空气对流，导致车厢内温度升高，生鲜品的腐败率也随之提高。设此时的腐败率为 $\varepsilon_2$  ( $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ )，则配送车辆在客户 $i$ 卸货过程中产生的货损成本 $P(D)_2$ 为

$$P(D)_2 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n y_{ik} P Q_{in} (1 - e^{-\varepsilon_2 s_{ik}}) \quad (11)$$

因此, 整个配送过程中产生的货损成本  $P(D)$  为

$$P(D) = P(D)_1 + P(D)_2 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n y_{ik} P[q_i(1 - e^{-c_1(t_{ik} - t_{0k})}) + Q_{in}(1 - e^{-c_2 s_{ik}})] \quad (12)$$

(5) 碳排放成本

在冷链配送过程中碳排放主要源于 2 个方面:

- ① 车辆运输过程中由于正常行驶和制冷消耗燃油产生的碳排放;
- ② 运行、卸载两阶段制冷剂消耗产生的碳排放。

通过前面对运行费用和制冷成本的分析, 易知配送过程中总的油耗为

$$C(L) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ijk} d_{ij} c(Q_{in}) + \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \alpha x_{ijk} t_{ij} + \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n b y_{ik} s_{ik} \quad (13)$$

设  $c_1$  为每单位燃油的碳排放量, 因此, 整个配送过程中因消耗燃油产生的碳排放成本为

$$P(C)_1 = \lambda c_1 C(L) \quad (14)$$

式中:  $\lambda$  为碳税, 是因排放  $\text{CO}_2$  需要交纳的环境税, 为每单位碳排放成本(元/kg)。

运行过程中消耗制冷剂产生的碳排放与运行时间近似成正比。同样, 车辆配送完最后一位客户返回配送中心的这段路程无制冷剂消耗。

$$P(C)_{21} = \lambda c_2 \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} t_{ij} \quad (15)$$

式中:  $c_2$  为运行过程中单位时间内制冷剂消耗产生的碳排放量。

卸货过程中, 由于制冷装置全程开放, 制冷剂消耗量较多, 且与卸货时长近似成正比。

$$P(C)_{22} = \lambda c_3 \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n y_{ik} s_{ik} \quad (16)$$

式中:  $c_3$  为卸货过程中单位时间内制冷剂消耗产生的碳排放量。

综上所述, 整个配送途中碳排放成本为  $P(C) = P(C)_1 + P(C)_{21} + P(C)_{22} =$

$$\lambda c_1 C(L) + \lambda c_2 \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} t_{ij} + \lambda c_3 \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n y_{ik} s_{ik} \quad (17)$$



## 2.4 模型建立

目标函数:

$$\min Z = WTC + \sum_{i=1}^n P_i(t_i) + P(R) + P(D) + P(C) \quad (18)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^n q_i y_{ik} \leq Q_k \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = 1, \quad i \in (1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{0k} = m \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = 1, \quad k \in (1, 2, \dots, m) \quad (22)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{il} - \sum_{j=0}^n x_{lj} = 0, \quad l \in (1, 2, \dots, n) \quad (23)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} = y_{jk}, \quad j \in (1, 2, \dots, n); k \in (1, 2, \dots, m) \quad (24)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ijk} = y_{ik}, \quad i \in (1, 2, \dots, n); k \in (1, 2, \dots, m) \quad (25)$$

其中, 式(19)表示车辆 $k$ 装载货物总量不超过其额定载重量; 式(20)表示每个客户点都被且仅被服务一次; 式(21)表示配送中心为车辆起点; 式(22)表示配送中心为车辆终点; 式(23)表示配送车辆到达客户点 $l$ 后, 仍从这点离开; 式(24)、(25)表示2个变量之间的关系。

## 3 算法设计

本文提出的冷链配送路径优化模型相对于普通的VRP问题, 增加了车载容量限制、客户时间窗约束、碳排放成本等, 问题的复杂度和难度显著提高。针对这种复杂的车辆路径问题, 即便使用传统启发式算法可以获得可行的解决方案, 但是与最优解相比还存在较大的差距。这时就需要对传统启发式算法进行适当融合、改进, 以改善算法的性能, 让其更适于求解本文所构建的优化模型。蚁群算法虽然初期信息素匮乏, 求解缓慢, 但是由于它的正反馈机制, 使其在搜索的后期表

<http://www.china-simulation.com>

以上内容仅为本文档的试下载部分, 为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文, 请访问: <https://d.book118.com/478123121065007003>