

3-15-2024

Joint Distribution-Inventory Optimization and Simulation for Cold Chain Logistics Considering Order Substitution

Yuanpeng Wan

Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China, 1272803014@qq.com

Chengji Liang

Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Sihong Wang

Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Yu Wang

Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Joint Distribution-Inventory Optimization and Simulation for Cold Chain Logistics Considering Order Substitution

Abstract

Abstract: The most important purpose of cold chain logistics is to ensure product freshness, and how to reduce the cost of order distribution on this basis is an urgent problem for cold chain companies. For consumers, product quality and food safety are their main needs. Therefore, by taking the distribution center as the research object, the products were divided into different grades according to the initial freshness of the products before distribution, and the overall freshness of the products was improved by adopting the grade upward substitution mode for orders that do not meet the delivery requirements so that customers can obtain products with better quality as much as possible and get their needs met. At the same time, a two-layer planning model was established based on minimum freshness, inventory, and other constraints to jointly optimize the distribution and inventory allocation problems. The upper layer model determines the order distribution and inventory allocation scheme with the goal of minimizing the sum of transportation costs, cargo loss costs, and other cost. The lower model determines the order that needs to be replaced and the product grade that needs to be replaced with the goal of minimizing order substitution costs. An improved adaptive genetic algorithm and a cplex solver were used to solve the upper and lower model respectively. The solved distribution scheme was verified by a simulation model that simulated road congestion and re-added to the double-layer model for planning. The solution shows that order substitution can effectively reduce the operating costs of enterprises and obtain more realistic order distribution and inventory allocation schemes.

Keywords

inventory route optimization, freshness, order substitution, road congestion, cold chain logistics simulation, genetic algorithm

Recommended Citation

Wan Yuanpeng, Liang Chengji, Wang Sihong, et al. Joint Distribution-Inventory Optimization and Simulation for Cold Chain Logistics Considering Order Substitution[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 578-594.

考虑订单替换的冷链配送-库存联合优化与仿真

万远鹏, 梁承姬, 王思洪, 王钰

(上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 冷链物流最重要的目的是保证产品新鲜度, 而在此基础上如何降低订单配送的成本是冷链公司急需解决的问题。对消费者来说, 产品的质量与食品安全是其主要的需求。因此以配送中心为研究对象, 在配送之前根据产品初始新鲜度将产品分成不同的等级, 通过对不符合配送要求的订单采用等级向上的替换模式来提升产品整体新鲜度, 使客户尽可能获得更好质量的产品, 确保顾客的需求得到满足, 同时针对配送与库存分配问题进行联合优化, 根据最低新鲜度、库存量等为约束建立了双层规划模型, 其中上层模型以运输成本、货损成本等之和最小为目标以此确定订单配送以及库存分配方案, 下层模型以订单替换成本最小为目标以此确定需要进行订单替换的订单以及替换的产品等级, 通过提出改进的自适应遗传算法与cplex分别求解上下层模型, 将求解得到的配送方案代入模拟了道路拥堵的仿真模型中进行验证并重新加入双层模型中进行规划; 对算例求解的结果表明: 订单替换可以有效降低冷链企业运营成本, 获得更符合实际的订单配送与库存的分配方案。

关键词: 库存路径优化; 新鲜度; 订单替换; 道路拥堵; 冷链物流仿真; 遗传算法

中图分类号: TP301

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2024)03-0578-17

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1232

引用格式: 万远鹏, 梁承姬, 王思洪, 等. 考虑订单替换的冷链配送-库存联合优化与仿真[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(3): 578-594.

Reference format: Wan Yuanpeng, Liang Chengji, Wang Sihong, et al. Joint Distribution-Inventory Optimization and Simulation for Cold Chain Logistics Considering Order Substitution[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 578-594.

Joint Distribution-Inventory Optimization and Simulation for Cold Chain Logistics Considering Order Substitution

Wan Yuanpeng, Liang Chengji, Wang Sihong, Wang Yu

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The most important purpose of cold chain logistics is to ensure product freshness, and how to reduce the cost of order distribution on this basis is an urgent problem for cold chain companies. For consumers, product quality and food safety are their main needs. Therefore, by taking the distribution center as the research object, the products were divided into different grades according to the initial freshness of the products before distribution, and the overall freshness of the products was improved by adopting the grade upward substitution mode for orders that do not meet the delivery requirements so that customers can obtain products with better quality as much as possible and get their needs met. At the same time, a two-layer planning model was established based on minimum freshness, inventory, and other constraints to jointly optimize the distribution and inventory allocation problems. The upper layer

收稿日期: 2022-10-16

修回日期: 2023-01-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71972128); 国家重点研发计划(2019YFB1704403); 上海市软科学研究项目(22692111200)

第一作者: 万远鹏(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为冷链物流运输优化。E-mail: 1272803014@qq.com

model determines the order distribution and inventory allocation scheme with the goal of minimizing the sum of transportation costs, cargo loss costs, and other cost. The lower model determines the order that needs to be replaced and the product grade that needs to be replaced with the goal of minimizing order substitution costs. An improved adaptive genetic algorithm and a cplex solver were used to solve the upper and lower model respectively. *The solved distribution scheme was verified by a simulation model that simulated road congestion and re-added to the double-layer model for planning.* The solution shows that order substitution can effectively reduce the operating costs of enterprises and obtain more realistic order distribution and inventory allocation schemes.

Keywords: inventory route optimization; freshness; order substitution; road congestion; cold chain logistics simulation; genetic algorithm

0 引言

随着城市化进程的不断深入,我国生鲜产品的消费需求日益增加。生鲜产品在物流运输过程中产生的损耗主要发生在库存与运输两个环节,且库存与运输环节存在效益悖反关系,因此库存与路径联合优化是提高物流效率的关键^[1]。对于生鲜产品来说,由于产品在采集时自身的形状、大小与品质都不相同,在流通之前需要对产品进行分级,这样可以实现生鲜产品的分级销售,保障生鲜质量与食品安全^[2]。对于消费者来说,通过对客户订单进行产品等级向上的替换方式,可以满足客户对于更优质量生鲜产品的偏好,有效提高冷链企业竞争力。

现在对于冷链物流库存路径问题(inventory and route problem, IRP)的研究主要侧重于对冷链供应链系统的优化,针对两级(供应商-零售商)或三级(生产商-分销商-零售商)冷链供应链,以系统利润最大化为目标,确定各级成员的最佳库存策略以及运输方案^[3-4]。在此基础上,文献[5]根据产品货架期的长短将产品分级,通过对客户订单实施等级向上的替换,保证客户订单的成功配送,并通过提出的自适应生物地理优化算法进行算例求解。文献[6]建立可持续和高效的食品供应链体系,以最小化系统的总费用、最大化平均食品质量、最小化碳排与最短的交货期时间为多目标,建立生产库存路径配送模型,通过 GLNPSO 算法

进行求解。文献[7]研究智能物流系统集成规划问题,以最小化总成本,最大化平均食品质量为目标,设计两阶段迭代启发式方法与模糊逻辑方法相结合进行求解,通过随机算例表明算法有效性与效率。文献[8]针对传统风险评估方法的不足,设计基于贪婪策略预优化并结合变邻域搜索的多目标粒子群混合优化算法对库存路径问题进行求解,通过标准测试函数表明算法有效性与效率。其中对于子问题冷链物流车辆路径问题来说。文献[9]将道路拥堵因素加入绿色冷链物流车辆问题中去,通过改进的蚁群算法进行求解,验证了模型与算法的效果。文献[10]将天气因素条件下的交通情况加入冷链物流配送模型中,以配送总成本最小为目标,利用改进的蚁群算法进行求解。文献[11]根据不同道路状况建立车速特征模型,以配送总成本和客户满意度为目标建立农产品配送模型,通过改进的自适应遗传算法确定配送方案。文献[12]根据路网交通的时变特征,以系统总成本最小为目标,构建了易腐品生产-配送模型,通过设计的混合遗传算法验证了模型和算法的有效性。

上述文献对冷链库存路径问题的研究还存在以下不足:①供应链系统大多由大型冷链企业与大型连锁超市构成,他们之间可以通过利润补偿机制保证以供应链整体为目标进行联合优化决策^[13],而我国冷链物流企业大多是中小企业^[14],在管理上较为松懈,产品在库时间长、运输时间长、冷藏车温度设置不合理等现象时常发生,导

致运输过程中部分产品发生腐烂与霉变，引起拒收退货的风险，而上述的研究很少针对这些问题以供应商为研究对象进行决策；②研究以最大化平均产品质量为目标，决策的是生产商生产的产品数量、零售商的配送顺序以及配送的产品数量，并没有考虑到由于道路拥堵或者冷链“断链”导致产品变质这一问题，而这就需要客户的订单进行替换或对运输过程的温度进行控制；③道路拥堵因素对生鲜品新鲜度的影响是作为约束加入模型当中的，在配送过程中，供应商通过改变配送路径或者生产计划来满足订单的要求，这就限制了配送路径的选择余地，同时没有考虑到消费者对于更优质量的生鲜产品的偏好；④考虑拥堵问题的时变路网数学模型中，大多将一天划分成多个时段，每个时段之间的速度变化是线性的，加速以及减速的过程是割裂的，而在实际运输过程中，冷藏车需要经历多次的停止以及加速过程。

因此，本文以中小企业供应商为研究对象，考虑消费者对于更优质量产品的偏好，根据订单替换、拥堵仿真模拟、制冷温度3个方面建立双层规划模型进行求解。通过仿真模型模拟冷链运输过程研究在最低新鲜度约束下，确定最佳的库存分配(分配给该订单的产品等级和各产品等级的数量)以及货物运输方案(包括配送路径以及制冷温度)，并对客户订单进行替换，使消费者获得更优的平均产品质量并以此解决因为道路拥堵因素导致的订单违约问题，同时优化供应商的运营成本，为供应商的决策提供依据。本文建立双层模型得到订单配送与库存分配的方案，根据各需求点的位置等信息利用 plant simulation 软件建立模拟了拥堵过程的冷链配送过程的仿真模型，并将方案代入仿真模型中进行检验，将不满足约束条件(即超出最低新鲜度限制)的订单重新代入双层模型中进行路径的重新分配，直至所有的订单都可以按照客户要求配送，以此来提高冷链企业决策的准确性。

1 问题假设与描述

为了方便读者对本文的理解，对文中提出的名词解释如下：

(1) 产品分级，是指由于产品在经历采摘、清洗、包装等环节造成了相同产品之间的质量差异，因此为了保证食品质量以及更好的销售，根据产品的新鲜程度将产品划分成不同的等级以不同的价格进行销售流通。

(2) 订单替换，是指在配送之前根据模拟的配送结果对客户订单进行替换管理即对于不符合配送要求的订单，将配送给客户的产品替换成等级更好的产品，以此保证对客户订单的满足。

(3) 库存分配方案，是指针对客户订单要求的产品等级以及数量对供应商仓库内生鲜产品的库存进行分配，通过不同等级产品组合配送的方式满足客户订单的需求。

针对双层模型的建立与求解，本文假设如下：

①每个客户订单只能由1辆车提供服务，不同的车辆可以服务不同的客户；②经过多个周期的运输，冷链企业配送中心仓库具有多个等级的货物；③客户的位置以及订单需求信息已知；④客户订单在满足最低新鲜度限制下可以接受多种等级产品，并且仓库内的货物可以在库存限制下配送给多个需求点；⑤冷藏运输车从配送中心出发，在配送完毕之后必须返回配送中心；⑥客户在每个周期内的需求是固定的，且仓库的库存量足够满足客户的要求，不存在缺货现象；⑦不考虑补货阶段产品发生的损耗。

根据上述假设，本文的问题描述如下：某生鲜批发市场的物流配送中心在其供应范围内为分销商进行配送，配送中心内每种新鲜度货物的库存量不同且不同等级货物存储区域不同。现已知每个需求点的需求量以及最低可接受新鲜度信息，配送中心有若干可支配的冷藏车进行调度，根据客户订单要求安排车辆进行配送，目标是在最低总运营成本下实现所有订单的完美配送，以此来

实现配送中心与客户的双赢, 因此在进行库存分配以及运输决策时, 考虑下列问题:

(1) 订单是否替换以及替换的产品等级。货物新鲜度随运输时间以及服务时间的增加而降低, 当订单的产品新鲜度低于最低新鲜度时会出现拒收退货现象, 因此对订单进行替换使之满足最低新鲜度约束, 可以提高客户的满意程度。而替换等级越高的产品所需的订单替换成本越大, 但相应的货损成本会减少。

(2) 车辆运输过程制冷温度的设置。由于柴油冷藏车制冷需要消耗燃料以及制冷剂, 制冷温度发生改变, 相应的燃料消耗、制冷成本、以及货

损成本发生改变。

(3) 库存分配方案的确定。不同的库存分配方案导致货物出库时间不同, 反映在库存中是不同等级的货物在配送中心存储时长以及存储量的不同, 相应的库存制冷成本会发生改变。而不同的库存分配方案也会导致运输过程中货损成本的不同。

具体的库存分配与运输决策过程如图1所示。

2 双层模型构建

2.1 参数设置

本文主要参数如表1~3所示。

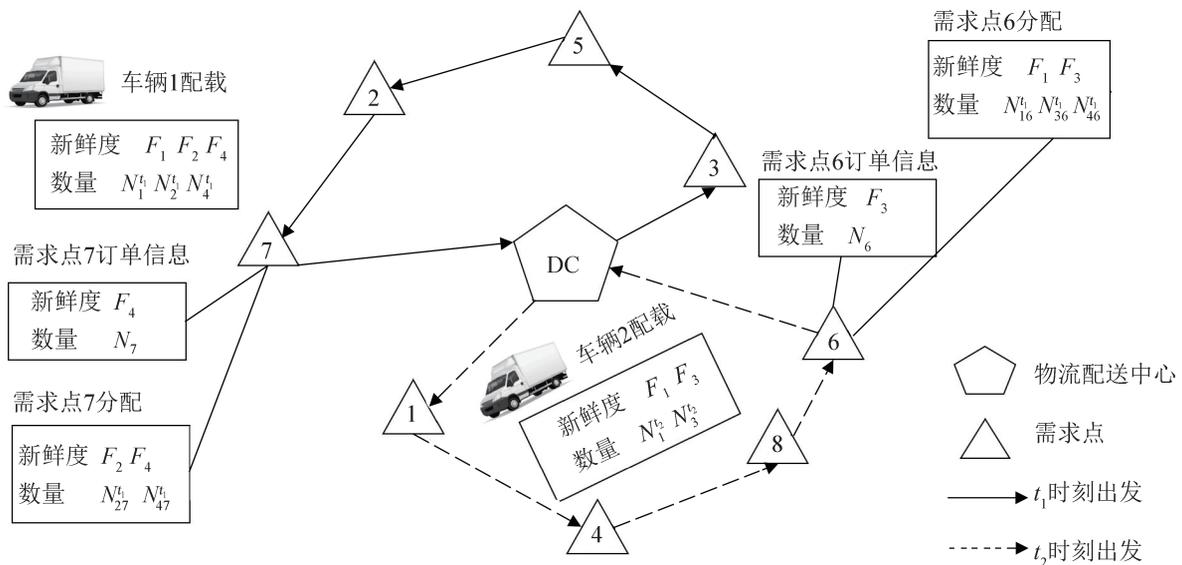


图1 库存分配与订单配送示意图
Fig. 1 Inventory allocation and order distribution

表1 集合
Table 1 Set

符号	含义
C	各需求节点集合, $C \subset \{0, 1, 2, \dots, c\}$, c 为需求节点个数, 0 表示配送中心节点
D_{ij}	需求点 i 到需求点 j 的距离, $i, j \in C, i \neq j$
K	配送中心所有车辆集合, $K \subset \{1, 2, \dots, k\}$, k 为配送中心冷藏车数量
Q	货物质量等级集合, $Q \subset \{1, 2, \dots, q\}$, 越新鲜的产品质量等级越小
e	用质量等级为 e 的产品替代质量等级为 q 的产品, $e \in Q$, 其中 $e = q - 1$
W	冷藏车制冷温度, $W \subset \{1, 2, \dots, w\}$, 单位为 $^{\circ}\text{C}$
p	货物的单价集合, $p \subset \{p_1, p_2, \dots, p_q\}$

表 2 参数
Table 2 Parameters

符号	含义
t_k	车辆 k 装载完所有生鲜产品后的出库时间
T_c	生鲜产品在仓库内存储时的库存制冷温度
A_{ki}	车辆 k 到达需求点 i 时的时间
d_{iq}	分配给需求点 i 产品等级为 q 的数量
p_q	等级为 q 的产品的单价
P_r	冷藏车发动机的功率(开制冷压缩机、空调等),在不同的冷藏温度下取值不同
η	冷藏车传动效率
G	冷藏车当前载重(当前运输时刻下车辆重量)
a	当前运输时刻下冷藏车的加速度
v	冷藏车运输过程中的实时速度
ρ	当前空气密度
Cd	空气动力阻力系数
Cr	冷藏车滚动阻力系数
S_A	车辆正表面面积
ψ	燃料空气质量比
f_c	冷藏车发动机摩擦系数
N	冷藏车发动机转速
d_c	冷藏车发动机排量
h_d	柴油燃料热值
φ	柴油 g/s 到 L/s 的转换因子
ζ	冷藏车车厢的热传导系数
S_c	冷藏车车厢的平均表面积
S_b	冷藏车车厢开口面积
h_A	空气表面对流传热系数
T_o	订单配送过程中室外温度
d_o	与开门频率有关的参数
t_{ij}	从需求点 i 到 j 的时间
t_{ki}	冷藏车 k 在需求点 i 的服务时间
p_d	单位柴油价格
p_s	驾驶员的单位工资(小时)
p_f	单位热量需要制冷剂的成本
A	Arrhenius 方程因子
E	活化能
R	摩尔气体常数

表 3 决策变量
Table 3 Decision variables

符号	含义
X_{ijk}	当车辆 k 从需求点 i 行驶到 j 进行货物运输时, $X_{ijk}=1$, 否则为 0
H_{iq}	当分配给需求点 i 的 q 等级产品需要进行换货处理时, $H_{iq}=1$, 否则为 0
T_K	车辆 k 在运输配送过程中的制冷温度为开尔文 K。与摄氏度 T_c 的换算关系为 $T_c = T_K - 273.15$

2.2 上层模型构建

2.2.1 产品新鲜度模型

对于生鲜产品冷链物流来说, 运输环境(温度)对于产品货架期有很大的影响。一般来说, 水果的库存温度为0~5 °C; 流通加工包装的温度在16 °C左右; 运输过程中车辆内部的温度为0~10 °C甚至更低^[15]。这是因为温度影响酶的活性使得生鲜品的呼吸作用变慢, 腐烂速率下降, 进而影响产品的质量变化, 但是过低的温度也会诱发果实软化、皱缩、褐变。因此对于易腐生鲜水果来说, 存储和运输的过程中冷藏温度的控制尤为重要。

为了更好地反映温度对生鲜品在储存以及运输过程中的质量变化, 本文引入基于腐烂指数的货架期模型^[16]:

$$F_i^{T_k} = f_0 + A \times e^{-E/R \times T_k} \times t \quad (1)$$

式中: $F_i^{T_k}$ 为货物在冷藏温度($T_k - 273.15$) °C以及运输时间 t 小时下的腐烂程度; $A \times e^{-E/R \times T_k}$ 为呼吸作用的反应速率。

通过式(1)可知, 随着冷藏环境的温度 T_k 的升高, 反应速率也增大。因此冷藏环境的温度与易腐水果的产品的呼吸作用的强弱呈正相关。同样的随着配送时间的增加, 易腐水果腐烂程度也越大。借由该数学模型来表示产品经由配送中心加工、包装与存储后的腐烂程度, 从而将产品划分不同的质量等级 $Q \subset \{1, 2, \dots, q\}$, 并根据不同生鲜产品的特性确定相对应的最低腐烂度值 \bar{F} , 之后在配送过程中将超出最低腐烂度的订单进行替换, 换用更好等级的产品进行配送, 以此来实现对客户订单的管理。

2.2.2 油耗预测模型

车辆油耗的影响因素大致可以分成5个: ①车辆自身(即发动机功率等); ②环境(即道路路况等); ③交通(即道路拥堵情况); ④司机(即司机的操作); ⑤操作(即行驶速度等)。因此本文引入微观尾气排放模型^[17-18]来对冷藏车柴油发动机的油

耗进行预测, 首先通过力学模型算出发动机总牵引功率进而算出每秒发动机的输出功率, 最后算出燃料消耗效率。该模型如下:

发动机的总牵引功率为

$$P_t = (Ga + Gg \sin \theta + 0.5Cdph_A v^2 + GgCr \cos \theta) \times v / 1000 \quad (2)$$

式中: $0.5Cdph_A v^2$ 为空气阻力的大小, 与 v 和 S_A 呈正相关; $GgCr \cos \theta$ 为车辆所受摩擦力的大小, 与 G 呈正相关, 其中 θ 为道路与水平面所呈的角度。

每秒发动机的输出功率为

$$P = P_t + P_r / \eta \quad (3)$$

式中: P_r 反映了制冷温度对车辆油耗的影响。

柴油燃料每秒的消耗效率为

$$FCr = \phi(f_c Nd_c + P/\eta) / h_d \quad (4)$$

式中: $f_c Nd_c + P/\eta$ 为发动机的每秒的功效。

因此计算一段时间内的燃料消耗为

$$FCg = \int_{t_1}^{t_2} FCr dt = \phi f_c Nd_c (t_2 - t_1) / h_d + \frac{\phi}{h_d} (P_r (t_2 - t_1) + \int_{t_1}^{t_2} P_t dt / \eta) \quad (5)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} P_t dt = (G(a + g \sin \theta + gCr \cos \theta)) \int_{t_1}^{t_2} v dt + \frac{0.5Cdph_A \int_{t_1}^{t_2} v^3 dt}{1000} \quad (6)$$

则单位时间内消耗燃料(单位升)为

$$FCI = \frac{FCg}{\phi} = \alpha((f_c Nd_c + \frac{P_r}{\phi})(t_2 - t_1) + \beta \gamma G \int_{t_1}^{t_2} v dt + \beta \int_{t_1}^{t_2} v^3 dt) \quad (7)$$

式中: $\alpha = \phi / h_d$; $\beta = 1/1000 \times \eta$; $\gamma = (a + g \sin \theta + gCr \cos \theta)$ 。由式(7)可以看出, 该模型计算油耗由3个模块构成: ①速度模块, 油耗与瞬时速度(即当前时刻车辆的速度)的三次方成正比; ②发动机模块, 油耗与行驶时间成正比; ③车辆模块, 油耗与行驶距离和车辆重量的乘积成正比。

2.2.3 运输配送模型

(1) 运输成本

对于冷藏运输车来说，配送车辆的运输成本主要来源于油耗、司机工资以及车辆保养费用。

所有车辆配送过程中油耗的费用为

$$C_{11} = \sum_{i=0}^c \sum_{j=0, j \neq i}^c \sum_{k \in K} t_{ij} x_{ijk} FCI \times p_d \quad (8)$$

驾驶员的工资为

$$C_{12} = \sum_{i=0}^c \sum_{j=0, j \neq i}^c \sum_{k \in K} t_{ij} x_{ijk} \times p_s \quad (9)$$

运输成本表达式为

$$C_1 = C_{11} + C_{12} \quad (10)$$

(2) 制冷成本

制冷成本包括库存期间的制冷成本以及运输过程中的制冷成本。在运输过程中制冷成本由两部分组成，一部分是运输过程中车厢内温度与室温之间形成的热传导效应，另一部分是在需求点进行卸货服务时车厢门打开与室温空气形成的热对流效应^[19]。

车厢的热传导成本为

$$C_{21} = \sum_{k \in K} \sum_{i=0}^c \sum_{j=0, j \neq i}^c \zeta \times S_{c,k} \times (T_o - T_k) \times t_{ij} \times p_f \quad (11)$$

车厢的热对流成本为

$$C_{22} = \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^c h_A \times S_{b,k} \times (T_o - T_k) \times d_o \times t_{ki} \times p_f \quad (12)$$

库存期间的制冷成本为

$$C_{23} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in k} \sum_{q=1}^q d_{iq} \times f(q) \times t_k \quad (13)$$

因此制冷费用的表达式为

$$C_2 = C_{21} + C_{22} + C_{23} \quad (14)$$

式中： $f(q)$ 为单位制冷成本，与货物的等级有关。货物等级不同，存储的区域随之不同，相应的制冷成本也不同，具体不同等级产品与制冷成本之间的关系如图2所示。

(3) 货损成本

生鲜产品的货损主要发生在车辆运输和在仓库存储的过程中，由于自身呼吸作用以及外部环

境(存储、温度、湿度)等的影响，导致产品发生腐烂，造成产品的损失。因此本文以生鲜产品在运输与库存过程中产品质量的损失为优化目标，以此来提高客户收到产品的平均质量。

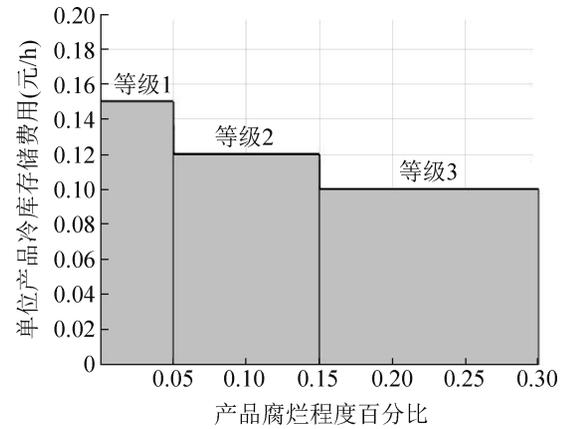


图2 产品储存成本函数图

Fig. 2 Cost function of product storage

根据式(1)的货架期模型，可得

货物在运输过程中的货损成本为

$$C_{31} = \sum_{j \neq i} \sum_{q=1}^q \sum_{k \in K} d_{iq} P_q x_{ijk} (F_{iq}^{T_k}(t_{ij}) - F_{iq}^{T_c}(t_k)) \quad (15)$$

货物在库存过程中的货损成本为

$$C_{32} = \sum_{k \in K} \sum_{j \neq i} \sum_{q=1}^q d_{iq} P_q x_{ijk} (F_{iq}^{T_c}(t_k) - F_{iq}) \quad (16)$$

货损费用的表达式为

$$C_3 = C_{31} + C_{32} \quad (17)$$

式中： F_{iq} 为需求点*i*所需要的*q*等级产品的初始新鲜度； $F_{ip}^{T_k}(t_{ij})$ 为*q*等级产品在温度*T_k*下运输到达需求点*j*时的新鲜度； $F_{ip}^{T_c}(t_k)$ 为*q*等级产品在温度*T_c*下存储直至出库时的新鲜度。

则上层模型的目标如下：

最小化的配送成本为

$$\min Z_1 = C_1 + C_2 + C_3 \quad (18)$$

约束条件为

每辆冷藏车都要从配送中心出发：

$$\sum_{j=0}^c x_{0jk} = 1, \quad \forall k \in K \quad (19)$$

防止冷藏车从配送中心出发后直接回到配送中心：

$$\sum_{i=1}^c x_{ijk} - \sum_{j=1}^c x_{ijk} = 0, \forall k \in K, i, j \in C, i \neq j \quad (20)$$

每辆冷藏车最终要回到配送中心:

$$\sum_{i=0}^k x_{i(c+1)k} = 1, \forall k \in K, c \neq 0 \quad (21)$$

每辆车所运输的产品重量不能超出车辆的最大负载:

$$\sum_{i=0}^c \sum_{j=0, j \neq i}^c \sum_{q=1}^q d_{iq} x_{ijk} \leq FC, \forall k \in K \quad (22)$$

每辆车只能服务一个需求点, 并且所以的需求点都要服务:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j=0}^c x_{ijk} = 1, \forall i \in C \quad (23)$$

防止路径中出现子回路:

$$\sum_{i, j \in H} x_{ijk} \leq |H| - 1, \forall H \subseteq C, |H| \geq 2 \quad (24)$$

保证时间传递:

$$A_{ki} + t_{ij} + t_{ki} - M(1 - x_{ijk}) \leq A_{kj}, \quad \forall i, j \in C, \forall k \in K \quad (25)$$

上层模型决策变量的约束:

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in C, \forall k \in K \quad (26)$$

$$T_k \in N, \forall k \in K \quad (27)$$

2.3 下层模型构建

由于客户对订单配送的满意程度影响企业在市场上的竞争力, 因此对于企业来说, 减少配送过程的退货并提高客户收到产品的平均质量显得十分重要, 而通过将超过最低新鲜度约束的订单产品进行更好产品等级货物的替换, 使之满足需求点的要求, 不仅可以减少退货还可以提高客户收到产品的平均质量。因此订单替换成本为

$$C_4 = \sum_{i=1}^c \sum_{q=1}^q \varepsilon \times (P_q - P_e) d_{iq} H_{iq} \quad (28)$$

可以看出, 订单替换成本是替代的等级 e 的产品单价与原等级 d 的产品单价差的 ε 倍。

则下层模型的目标如下:

$$\min Z_2 = C_4 \quad (29)$$

约束条件为

判断客户的订单是否需要替换, 如果产品

在到达客户点时超出最低新鲜度约束, 则需要配送之前对客户的订单进行替换, 选择产品等级更高的产品进行配送, 从而实现对产品的质量: 管理:

$$f_q + Ae^{-Ea/RT_k} \times (t_{ki} + t_{ji}) \geq \bar{F} \times H_{iq}, \quad \forall q \in Q, \forall i \in C, i \neq j, \forall k \in K \quad (30)$$

$$f_q + Ae^{-Ea/RT_k} \times (t_{ki} + t_{ji}) \leq \bar{F} + M \times H_{iq}, \quad \forall q \in Q, \forall i \in C, i \neq j, \forall k \in K \quad (31)$$

决策变量的约束:

$$H_{iq} \in \{0, 1\}, \forall i \in C, i \neq 0 \quad (32)$$

综上所述, 上层模型考虑冷藏车数量容量以及库存容量限制, 以运输成本、制冷成本以及货损成本之和最小为目标, 决策出订单配送的路径、冷藏车制冷温度以及库存分配方案。而下层模型是在最低新鲜度、库存容量限制的约束下, 以订单替换成本最小为目标, 根据上层模型的配送方案决策出需要进行替换操作的订单以及替换的产品等级。上层配送方案会影响下层模型订单替换成本, 同时订单替换方案也会影响上层模型的货损与制冷成本, 上下层模型的关系如图3所示。

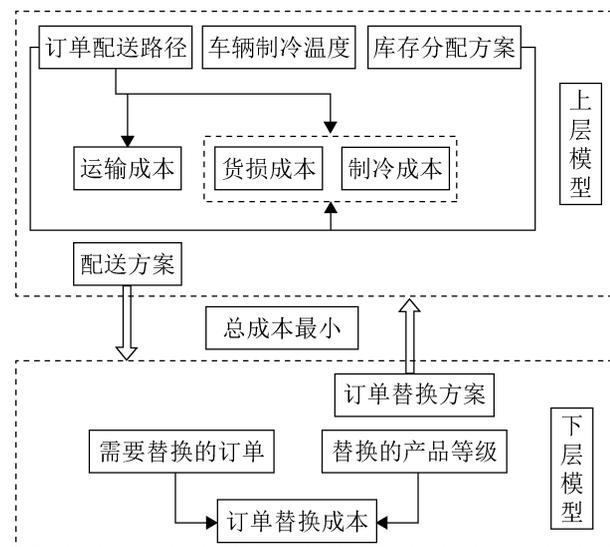


图3 双层模型关系图

Fig. 3 Two-layer model

3 仿真模型构建

Plant Simulation 仿真软件可以实现对生鲜订单配送全过程的模拟, 首先利用 Sim Talk 语言实

现对配送过程中道路拥堵的模拟，然后通过对初始配送方案的模拟运行，找出不满足最低新鲜度限制的订单。

在该仿真模型中主要有需求点、车辆行驶路径以及冷藏车等对象。各个对象的介绍如下：

(1) 需求点，需求点是由工站(station)表示，首先按照CPOS表里的 x 、 y 坐标产生，之后通过设置station的处理时间实现每个需求点服务时间的模拟。

(2) 冷藏车，冷藏车由MU小车表示，货物则由MU零件表示，通过生成器来每0.1 s进行产品新鲜度计算模拟货物的腐烂情况。

(3) 行驶路径，通过物料流中的轨道表示。首先按照Distance表产生，之后通过程序对不同时间段内(早晚高峰)道路的拥挤情况进行模拟，并通过传感器的设置实现对车辆加速以及减速过程的模拟，具体的时间段内的拥堵时间如图4所示。

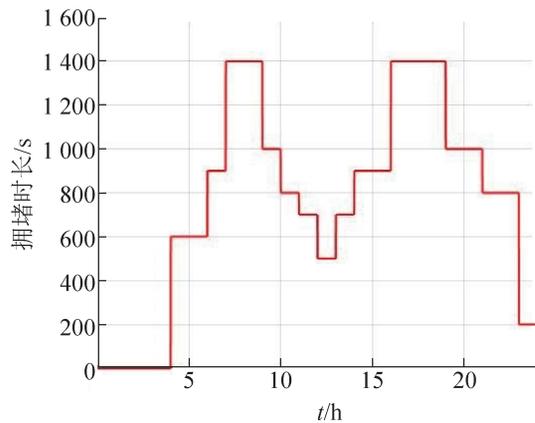


图4 仿真模型拥堵时间图

Fig. 4 Congestion time of simulation model

具体某次运输的仿真模型如图5所示。

根据双层模型求解得到的订单配送以及库存分配方案，将其代入仿真模型中进行验证。对于超出最低新鲜度要求的订单进行记录，将其重新加入双层模型中进行求解，得到新的订单配送以及库存分配方案，重复上述流程直到所有客户的订单可以完全配送才停止，此时确定最终的订单配送方案以及库存分配方案。结合仿真模型的配送库存联合优化的具体流程如图6所示。

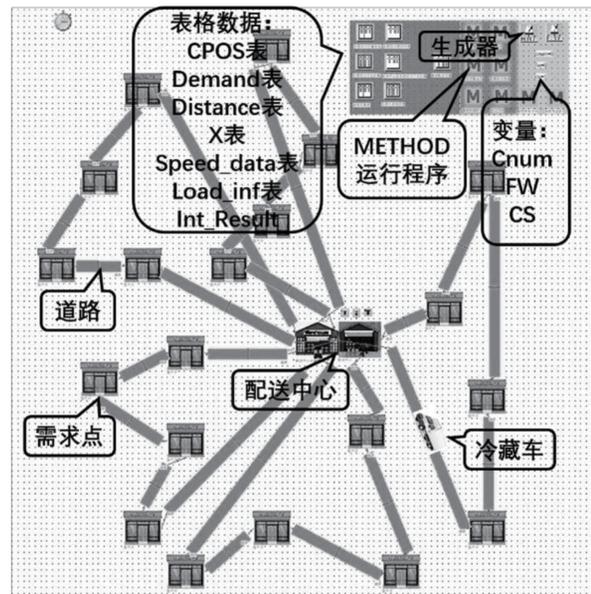


图5 配送过程仿真模型图

Fig. 5 Simulation model of distribution

4 算法设计

由于IRP问题是一个NP-hard问题，上层模型较为复杂，约束较多且可行解规模较大，而遗传算法作为一种模拟生物进化过程的启发式算法，可以很好的解决IRP问题^[20]。因此根据上述数据，本文利用Matlab编写自适应遗传算法对上层模型进行编码，求解订单配送方案以及库存分配方案。而下层模型所决策的问题是订单是否进行替换，以及替换产品的等级，这是根据上层模型中订单配送方案以及库存分配方案来判断的，即基于上层的订单的配送顺序以及分配给该订单的产品等级根据产品新鲜度模型进行判断的，它是一个混合整数规划问题，因此采用cplex求解器进行求解。

4.1 算法设置

针对上层模型的订单配送模型，本文采取实数编码的方式进行编码，在构造初始解时根据贪婪插入策略生成初始染色体^[21]，具体过程如下：

步骤1：将所有客户的订单加入订单集合 O 中。

步骤2：从集合 O 中随机取出一个订单进行配

送，计算此时刻的运输距离。

步骤 3: 从集合 O 中随机再取出一个订单 a , 将其插入步骤 2 中的配送路径的每个位置, 计算此时刻的运输距离的增加量, 选取运输距离增量最小的位置进行配送。

运输距离的增加量由两部分组成, 分别是插入后的距离增加量和离配送中心距离的惩罚量:

$$ID = D_{ia} + D_{aj} - D_{ij} - \delta(D_{0a} + D_{0j}) \quad (33)$$

式中: δ 为惩罚因子。

步骤 4: 持续更新当前配送路径, 直到超过车辆最大载重是结束该路径, 超出的那个订单当作下条路径的初始配送订单。

步骤 5: 重复步骤 3、4, 直到集合 O 中所有订单均被满足。

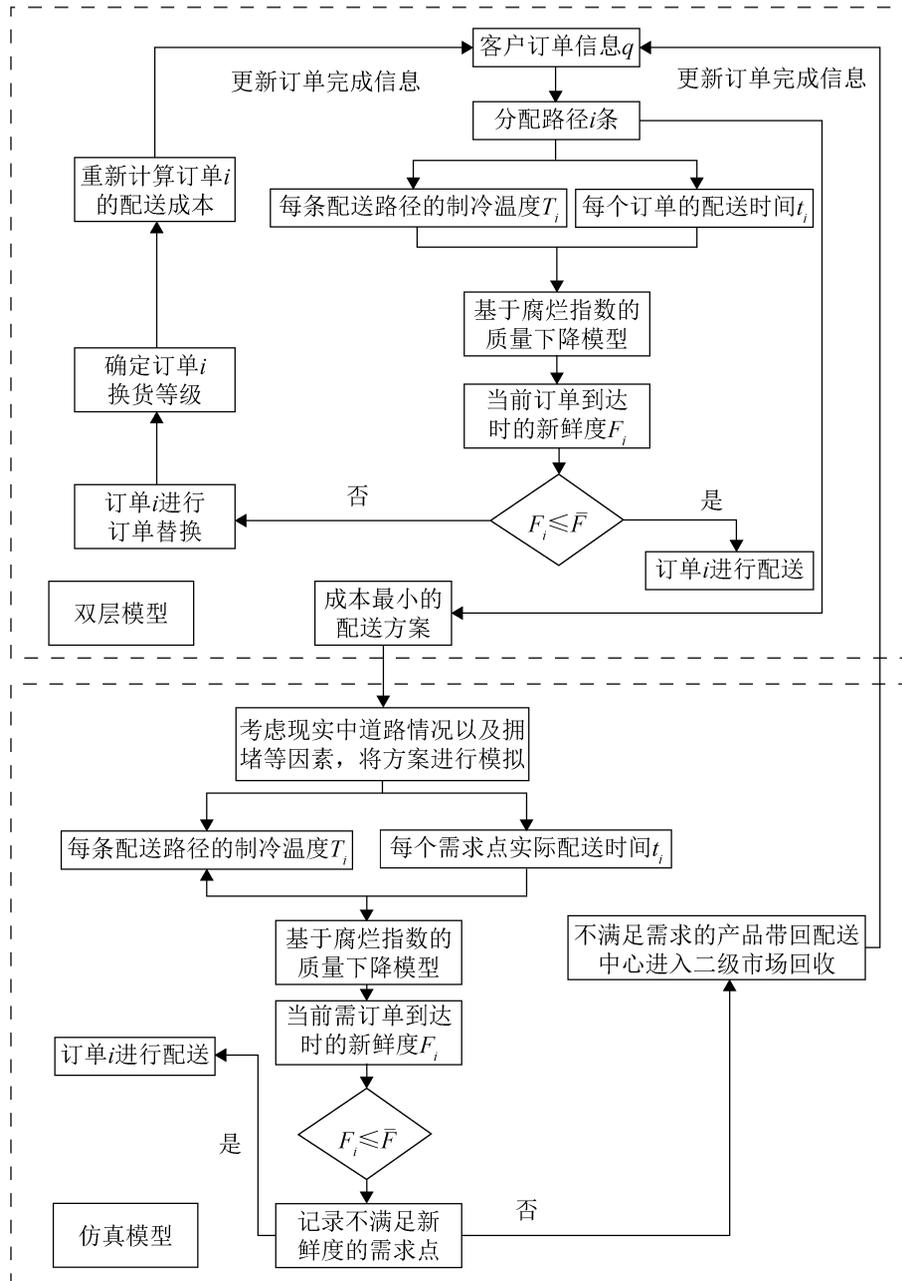


图 6 仿真模型求解流程图
Fig. 6 Solution process of simulation model

4.2 染色体结构

本文采用双层染色体编码的结构，第 1 层染色体有 25 个基因，前 20 个基因表示订单的编号，根据基因位置决定每辆冷藏车内订单配送的顺序，后面 5 个基因对应着 5 辆冷藏车制冷温度的设置，第 2 层染色体共 60 个基因，每 3 个基因对应一个订单的库存分配情况。具体染色体的结构如图 7 所示。

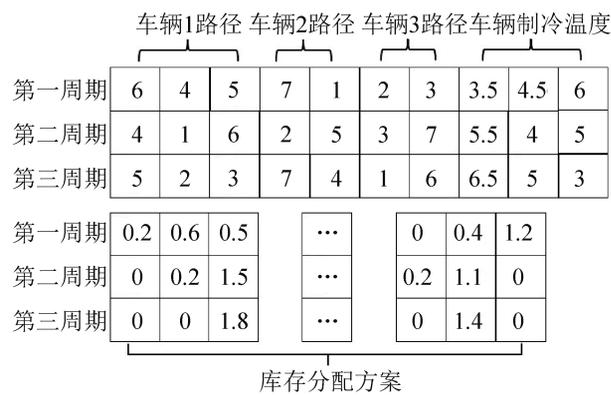


图 7 染色体结构图
Fig. 7 Structure of chromosome

图 7 中，染色体一共 6 层，其中每 2 层相互对应，例如第 1 层染色体中 6-4-5 代表着第一周期车辆 1 首先完成第 6 号订单的配送，然后再完成第 4 号与第 5 号，并且车厢制冷温度为 3.5°C。与此对应的是第 4 层染色体中有 60 个基因，每 3 个基因表示 1 个订单的库存分配情况，对应着 20 个订单，3 个基因分别对应等级 1、等级 2、等级 3 货物的数量，通过启发式的规则按订单配送顺序产生，因此 0.2-0.6-0.5 代表着分配给第一周期的第 6 号订单等级 1 的产品 0.2 t、等级 2 的产品 0.6 t、等级 3 的产品 0.5 t。

4.3 交叉与变异

本文的选择策略是交配池轮盘赌的方式选择个体，通过计算每个个体的相对适应度比重，并与选择概率进行比较，以此选择交配池。并且加入精英选择保留每一代最优表现的个体，加入下一代的迭代。

染色体交叉的目的是获得全新的遗传信息以此防止遗传过程陷入“早熟”，因此本文采用自适

应的交叉与变异的方式，对于优良个体减少其交叉变异概率，使之其中的优秀基因得以保留，反之对于较劣个体加大其变异交叉概率使之跳出劣质基因的限制。同时在算法迭代初期要加大交叉与变异概率使之可以快速地搜索最优解，在算法迭代按后期降低交叉变异概率使之可以快速收敛，因此本文的交叉与变异概率^[22]为

$$P'_c = \begin{cases} K_1 \frac{f_{\max} - f'}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ K_2, & f' \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (34)$$

$$P'_m = \begin{cases} K_3 \frac{f_{\max} - f_i}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f_i \geq f_{\text{avg}} \\ K_4, & f_i \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (35)$$

式中： f_{avg} 为种群中所有个体适应度的平均值； f' 为需要交叉的 2 个个体之间适应度较大的个体的适应度； f_i 为需要交叉的第 i 个体自身的适应度； K_1, K_2 为交叉参数， K_3, K_4 为变异参数。

算法中交叉操作为双切点交叉的方式，对于第 1 层染色体来说，针对路径与车辆制冷温度两部分分别选取交叉点，并在交叉后按交叉染色体的范围对第 1、第 2 层染色体进行修复。具体染色体交叉操作如图 8 所示。

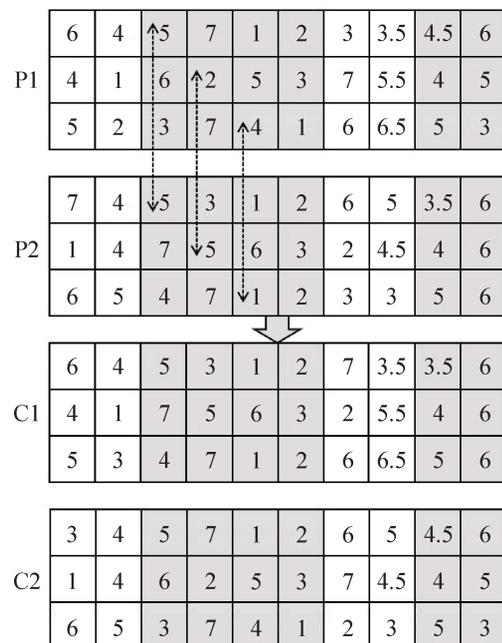


图 8 交叉操作算子
Fig. 8 Cross operators

图8中,在父代、母代染色体上路径部分与车辆制冷温度部分分别选择交叉点进行交叉,并且在交叉后根据基因位点对交叉后的染色体进行修复,保证每条染色体是可行解。变异操作与交叉操作类似,采用单点变异的方式。

5 算例实验

本文以长丰草莓配送为例进行算例实验。合肥某配送中心在一个计划期内对客户订单实行等级向上替换管理,一个计划期包含3个周期,配送中心在每周期初开始配送,仓库存储着质量等级不同的草莓,且在每个周末进行补货,按照剩余库存以及订单量进行补货至初始库存量,产品

的等级根据产品的初始腐烂程度划分,其中腐烂程度为0~5%是等级1产品;腐烂程度为5%~15%是等级2产品;腐烂程度为15%~25%是等级3产品,并且最大腐烂程度不超过35%,对于超过此限制的产品,需要带回配送中心随后进入二级市场进行回收,初始配送中心产品具体数量如表4所示。

该配送中心将草莓按照订单的要求送到客户手中,客户订单的具体信息如表5所示。

表4 配送中心库存信息

产品等级	产品数量/t
1	14
2	16
3	8

表5 客户订单信息

Table 5 Order information of customers

需求点编号	客户点坐标/km	客户需求量/t	产品需求等级	卸货时间/min
0	(105,105)			
1	(123,147)	[1,2,1,1.3]	[3,3,2]	[12,10,13]
2	(105,51)	[2,1.5,1.2]	[3,2,3]	[20,15,12]
3	(145,135)	[1.3,1.4,1.6]	[1-3]	[13-14,16]
4	(165,61)	[1.7,1.3,1.7]	[2,3,1]	[17,13,17]
5	(46,90)	[1.5,1.9,1.4]	[2,1,2]	[15,19,14]
6	(74,90)	[1.3,1.8,1.7]	[3,3,2]	[13,18,17]
7	(61,150)	[1.6,1.4,1.8]	[1,1,2]	[16,14,18]
8	(30,129)	[1.8,1.3,1.3]	[2,3,3]	[18,13,13]
9	(166,180)	[1.7,2,1.5]	[1,2,1]	[17,20,15]
10	(90,179)	[1.9,1.5,1.8]	[1,3,1]	[19,15,18]
11	(60,195)	[1.5,1.4,1.6]	[3,3,2]	[15,12,16]
12	(15,105)	[1.2,1.4,2]	[3,3,2]	[12,14,20]
13	(90,75)	[1.6,1.9,1.6]	[2,3,3]	[16,19-20]
14	(45,30)	[1.9,1.3,1.7]	[1,2,1]	[19,13,17]
15	(90,15)	[1.6,1.7,1.4]	[2,1,2]	[16,17,14]
16	(30,60)	[1.4,1.4,1.8]	[3,1,3]	[14,14,18]
17	(15,90)	[1.4,1.2,1.6]	[1,2,1]	[14,12,16]
18	(60,120)	[1.5,1.6,1.5]	[3,1,3]	[15,16,15]
19	(45,180)	[1.2,1.5,1.3]	[2,2,1]	[12,15,13]
20	(135,195)	[1.8,1.4,1.6]	[3,2,3]	[18,14,16]

5.1 算例计算结果

本文中冷链运输车采用的是福田6.6 m冷藏车,相关参数参考文献[23-24],具体参数取值如表6所示。

该配送中心一共有5辆冷藏车,冷藏车厢内部温度设置范围是3~8°C,3个等级产品的价格分别13 000元/t、12 500元/t与12 000元/t。与产品相关的参数取值如下:其中单位热量需要制冷剂的

成本为0.01元/w·min; Arrhenius方程因子取值为 1.71×10^{11} ; 活化能取值为58 200 KJ/Mol; 摩尔气体常数取值为8.314 J/(mol·k); 空气表面对流传热系数取值为5.9 W/(m²·K)。

表6 冷藏车相关参数取值

Table 6 Values for parameters related to refrigerated trucks

参数	取值	参数	取值
v/(km/h)	90	N/(Rev/s)	36.67
P_r	5~7	d_c/L	45
η	0.45	S_c/m^2	10.5
$\rho/(kg/m^3)$	1.204 1	S_o/m^2	4.1
C_d	0.6	d_o	0.25~1.5
C_r	0.01	$h_d/(KJ/g)$	44
S_A/m^2	4.032	$p_d/(元/L)$	7.5
ψ	1	$p_s/(元/h)$	30
$f_c/(KJ/Rev/L)$	0.2		

配送时间从05:00点开始,按照发车时刻表每隔1 h进行订单配送。根据上述参数利用Matlab平台对上层模型进行求解,并将结果代入cplex求解器中,通过对上下层模型的迭代求解得到在整个计划期内的最优解为125 624元,其中双层模型每次迭代最优解如表7所示。

表7 双层模型迭代结果

Table 7 Iterative results of two-layer model

项目	第一次迭代	第二次迭代	第三次迭代
上层模型成本/元	142 386	135 068	124 626
下层模型成本/元	8 637	3 975	0
上层模型订单替换率/%	33.3	10	0
总计成本/元	151 023	139 043	124 626

由表7可知,相较于第一次迭代,如果不对订单进行替换的话,上层模型中有33.3%的订单会超出最低新鲜度要求,带来拒货退货的风险,而经过下层模型的订单替换使得配送中心的运营总成本下降了17.4%,提高了客户满意度。将双层模型的配送方案加入仿真模型中检验得到的结果如表8所示。

如表8所示,经过仿真模型模拟后,还有20%的订单需要重新进行处理。而通过对这些订

单的重新替换,使得配送方案更具有合理性,并且相较于第一次迭代,第一周期配送中心的运营总成本下降了14.03%。第一周期具体经过仿真模型处理后的订单配送的最佳方案如表9所示,剩余周期的订单配送方案如表10~11所示。

表8 仿真模型结果

Table 8 Results of simulation model

项目	第一次模拟	第二次模拟
双层模型成本/元	124 626	129 825
仿真模型成本/元	6 012	0
双层模型订单替换率/%	13.3	0
总计成本/元	130 638	129 825

表9 第一周期各车辆订单配送方案

Table 9 Order distribution plan for each vehicle in the first period

车辆编号	制冷温度/°C	第一次配送方案	第二次配送方案
1	3	0-5-17-16-14-0	0-19-11-0
2	3	0-6-13-2-15-0	0-12-4-0
3	3	0-18-8-7-19-0	
4	3	0-1-20-10-11-0	
5	3	0-3-9-12-4-0	

表10 第二周期各车辆订单配送方案

Table 10 Order distribution plan for each vehicle in the second period

车辆编号	制冷温度/°C	第一次配送方案	第二次配送方案
1	3	0-2-15-13-6-0	0-11-0
2	3	0-5-17-16-14-0	
3	3	0-18-8-19-11-0	
4	3	0-7-10-20-9-0	
5	3	0-3-12-1-4-0	

表11 第三周期各车辆订单配送方案

Table 11 Order distribution plan for each vehicle in the third period

车辆编号	制冷温度/°C	第一次配送方案	第二次配送方案
1	3	0-6-13-2-15-0	0-8-16-0
2	3	0-7-18-8-19-0	
3	3	0-5-17-14-16-0	
4	3	0-1-10-11-20-0	
5	3	0-12-4-3-9-0	

通过双层模型可以得到订单配送的初始方案, 经过仿真模型模拟后, 得到了第二次配送的方案。以编号3的车辆为例, 在第一次配送中经过仿真模型的验证, 发现由于拥堵的原因, 导致第19号订单在配送过程中不满足最低新鲜度的要求, 因此在车辆分配的订单配送完成后对19号订单重新进行配送, 以此来获取客户满意度。第一周期每辆车具体的配载与订单分配情况见表12, 剩余周期的配载与订单分配情况如表13~14所示。

表12 各车辆第一周期配载以及订单分配信息
Table 12 Stowage information of each vehicle and order allocation in the first period

车辆 编号	车辆配载		订单 编号	卸货结 束时刻	库存分配货物数量/t		
	货物 等级	数量/ t			等级 1	等级 2	等级 3
1	1	3.8	5	05:56	0.2	1.3	0
	2	2.4	17	06:45	1.4	0	0
	3	0	16	07:36	0.3	1.1	0
2			14	08:41	1.9	0	0
	1	1.3	6	06:50	0	0.5	0.8
	2	4.4	13	07:35	0.5	1.1	0
3	3	0.8	2	08:37	0.4	1.6	0
			15	09:43	0.4	1.2	0
	1	2.8	18	08:12	0.2	1.3	0
4	2	3.2	8	09:12	0.4	1.5	0
	3	0	7	10:09	1.6	0	0
			19	10:56	0.4	1	0
5	1	2.1	1	09:05	0	0	1.2
	2	2	20	10:13	0.2	1.5	0
	3	1.2	10	11:14	1.9	0	0
1			11	12:01	0	1.5	0
	1	3.2	3	10:06	1.3	0	0
	2	2.5	9	11:08	1.7	0	0
2	3	0	12	12:21	0.2	1	0
			4	13:08	0	1.4	0
	1	0.2	19	14:26	0.2	1	0
3	2	1.5	11	14:57	0	0.5	1
	3	1					
	1	1	12	15:16	0	0	1.2
2	2	0.2	4	16:04	1	0.2	0
	3	1.2					

表13 各车辆第二周期配载以及订单分配信息
Table 13 Stowage information of each vehicle and order allocation in the second period

车辆 编号	车辆配载		订单 编号	卸货结 束时间	库存分配货物数量/t		
	货物 等级	数量/ t			等级 1	等级 2	等级 3
1	1	3.3	2	05:51	0.3	1.2	0
	2	3.6	15	06:34	1.7	0	0
	3	0	13	07:35	0.7	1.2	0
			6	08:07	0.6	1.2	0
2	1	3.2	5	07:01	1.9	0	0
	2	2.3	17	07:34	0.2	1	0
	3	0	16	08:11	1.4	0	0
3			14	08:47	0	1.3	0
	1	2.6	18	08:48	1.6	0	0
	2	2.9	8	09:21	0	1	0.3
4	3	0.3	19	10:11	0.4	1.1	0
			11	10:40	0.6	0.8	0
	1	1.4	7	09:42	1.4	0	0
5	2	3.4	10	10:15	0	0.2	1.3
	3	1.5	20	11:01	0	1.2	0.2
			9	11:44	0	2	0
1	1	0.9	12	10:44	0	0	1.4
	2	2.8	3	11:19	0.5	0.9	0
	3	1.4	1	12:05	0.4	0	0
2			4	13:12	0	1.3	0
	1	0	11	14:06	0	0	1.4
	2	0					
3	3	1.4					

5.2 灵敏度分析

对于生鲜产品来说, 温度控制是保证货物质量的关键, 企业花费的大部分成本都是为了维持生鲜配送过程中的冷链环境。因此为了优化企业的运营成本, 本文考虑车辆载重、车辆速度对订单配送总成本的影响, 通过将上述2种因素按一定比例进行调整, 验证算法以及模型的有效性。具体结果如图9~10所示。

表 14 各车辆第三周期配载以及订单分配信息
Table 14 Stowage information of each vehicle and order allocation in the third period

车辆 编号	车辆配载		订单 编号	卸货结 束时间	库存分配货物数量/t		
	货物 等级	数量/ t			等级 1	等级 2	等级 3
1	1	1	6	05:39	0.2	1.5	0
	2	3.3	13	06:10	0	0	1.6
	3	1.6	2	06:41	0.4	0.8	0
			15	07:39	0.4	1	0
2	1	2	7	07:02	0.8	0.6	0
	2	3.8	18	07:37	0.3	1.2	0
	3	0	8	08:26	0.2	1.1	0
			19	09:14	1.3	0	0
3	1	4.3	5	07:55	0.7	0.7	0
	2	2.1	17	08:31	1.6	0	0
	3	0	14	09:49	1.7	0	0
			16	10:29	0.3	1.4	0
4	1	3.3	1	08:43	0	1.3	0
	2	3	10	09:32	1.8	0	0
	3	0	11	10:11	0.9	0.7	0
			20	11:17	0.6	1	0
5	1	2.6	3	10:01	0	0	1.6
	2	1.6	9	10:46	1.5	0	0
	3	1.6	12	12:16	0.4	1.6	0
			4	13:04	1.7	0	0
1	1	0	8	14:05	0	0	1.3
	2	1.8	16	15:09	0	1.8	0
	3	1.3					

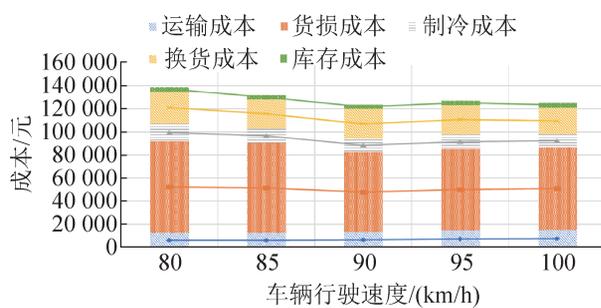


图 9 车辆速度与成本关系图
Fig. 9 Relationship between vehicle speed and cost

如图 9 所示，当车辆速度逐步增加的时候，总成本是先降低再增加，这是因为速度越快使得配送时间越短进而减少了产品在运输过程的损耗即降低了货损成本，但是速度越快也会增加运输

过程中的油耗，这样会导致运输成本的增加，同时油耗与速度的关系成指数级增长，从而最终导致总成本的增加。

因此，驾驶员在运输过程中可能为了降低车辆的油耗从而选择较慢的速度行驶，但是对于企业来说，为了降低配送过程中的货损以及制冷成本，让驾驶员在运输过程中适当的增加车速是非常必要的，它可以降低货物的损耗，提高企业的经济效益。

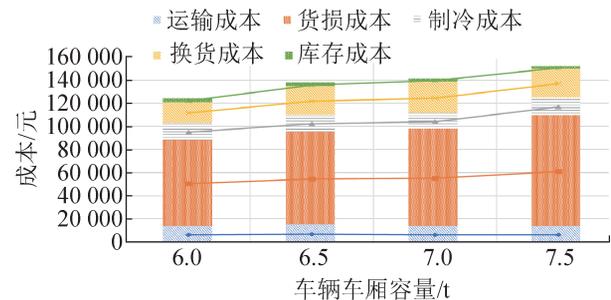


图 10 车辆容量与成本关系图
Fig. 10 Relationship between vehicle capacity and cost

如图 10 所示，当车辆容量增加时，运输成本是降低的，但是幅度越来越低，说明容量增加使可选择的路线增多，但对于最佳路线的影响较小，并且由于容量的增加一次性可以完成的订单数量也是增加的，这就导致一次配送的时长有所增加，使得货损成本增加。

因此，对企业来说，在当前运力可以满足订单的基础上没有必要提高车辆的运载能力(即购买更大载重的冷藏车)，虽然可以更好的满足订单，但很难带来经济效益。

6 结论

冷链需求的不断增加使得市场竞争越发激烈，因此为了降低企业运营成本，维系客户，本文通过订单替换满足消费者对于更优质量产品的偏好，针对生鲜品冷链物流中的运输与存储两个重要环节进行联合优化。

本文首先根据生鲜产品的时腐特征建立了产品新鲜度模型，之后以运输成本、制冷成本以及

货损成本之和最小为目标建立了上层模型以此决策出订单配送的路径、冷藏车制冷温度以及库存分配方案。随后以订单替换成本最小为目标建立了下层模型决策出上层模型的配送方案决策需要进行替换操作的订单以及替换的产品等级。通过将双层模型的结果代入仿真模型进行模拟, 实现了对现有方案的验证以及重新规划, 最终确定最佳配送以及库存分配方案, 有效的控制了产品在配送过程中产生的损耗, 实现了对客户订单的安全配送。通过对车辆速度、容量的灵敏度分析, 企业在订单配送的过程中要适当的让司机提高车速并且保证以较低的温度进行配送, 从而降低企业的运营成本, 实现客户与企业的双赢。

本文只针对配送中心进行了研究, 虽然考虑了客户对于更好产品质量的偏好, 但是没有考虑到不同质量产品的售价问题, 之后可以针对两级冷链系统, 以供应链利润最大化为目标研究产品的定价与库存路径问题。另外本文中仿真模型对于拥堵的设定通过时间依赖函数表示, 只对晴好天气下的交通情况做了初步的模拟, 未来可以根据不同的天气信息, 对仿真中的拥堵过程进行更精准的模拟, 增加仿真场景的适用性。

参考文献:

- [1] 吴旭. 城市生鲜农产品冷链物流库存与配送协同优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Wu Xu. Research on Collaborative Optimization of Cold Chain Logistics Inventory and Distribution of Urban Fresh Agricultural Products[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [2] 陈军. 考虑消费者选择行为的农产品质量分级博弈分析[J]. 运筹与管理, 2020, 29(10): 68-75.
Chen Jun. Game Analysis of Agri-food Quality Classification Under Consumer Selection Behavior[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(10): 68-75.
- [3] Ji Ying, Du Jianhui, Han Xiaoya, et al. A Mixed Integer Robust Programming Model for Two-echelon Inventory Routing Problem of Perishable Products[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 548: 124481.
- [4] Azadeh A, Elahi S, Farahani M H. A Genetic Algorithm-taguchi Based Approach to Inventory Routing Problem of a Single Perishable Product with Transshipment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 104: 124-133.
- [5] Hsiao Y H, Chen Muchen, Chin C L. Distribution Planning for Perishable Foods in Cold Chains with Quality Concerns: Formulation and Solution Procedure [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 61: 80-93.
- [6] CHAN F T S, Wang Z X, Goswami A, et al. Multi-objective Particle Swarm Optimisation Based Integrated Production Inventory Routing Planning for Efficient Perishable Food Logistics Operations[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(17): 5155-5174.
- [7] Li Yantong, Chu Feng, Yang Zhen, et al. A Production Inventory Routing Planning for Perishable Food with Quality Consideration[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(3): 407-412.
- [8] 巫威眺, 王殿雷, 马昌喜. 液化天然气库存路径问题建模与算法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 252-270.
Wu Weitiao, Wang Dianlei, Ma Changxi. Model and Algorithm for Inventory Routing Problem of Liquefied Natural Gas[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11): 252-270.
- [9] 赵志学, 李夏苗, 周鲜成, 等. 考虑交通拥堵的冷链物流城市配送的GVRP研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(1): 224-231.
Zhao Zhixue, Li Xiamiao, Zhou Xiancheng, et al. Research on Green Vehicle Routing Problem of Cold Chain Distribution: Considering Traffic Congestion[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(1): 224-231.
- [10] 赵邦磊, 桂海霞, 李慧宗, 等. 考虑交通状况的冷链物流路径优化[J]. 制造业自动化, 2021, 43(4): 90-95.
Zhao Banglei, Gui Haixia, Li Huizong, et al. Cold Chain Logistics Route Optimization Considering Traffic Condition[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(4): 90-95.
- [11] 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.
Wang Heng, Xu Yaxing, Wang Zhenfeng, et al. Distribution Routing Optimization of Fresh Agricultural Products Based on Road Conditions[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(1): 126-135.
- [12] 吴瑶, 马祖军. 时变路网下带时间窗的易腐食品生产-配送问题[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(1): 172-181.
Wu Yao, Ma Zujun. Time-dependent Production-

- Delivery Problem with Time Windows for Perishable Foods[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2017, 37(1): 172-181.
- [13] 王淑云, 姜樱梅, 王宪杰. 变质率呈Weibull分布的一体化三级冷链库存策略研究[J]. *管理工程学报*, 2015, 29(2): 229-239.
Wang Shuyun, Jiang Yingmei, Wang Xianjie. An Integrated Three-echelon Inventory Model for Cold Chain Items with Weibull Distribution[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2015, 29(2): 229-239.
- [14] 黎莎, 修睿, 计明军. 基于新鲜度动态变化的冷链物流库存分配与运输路径联合优化[J]. *系统工程*, 2021, 39(5): 69-80.
Li Sha, Xiu Rui, Ji Mingjun. Integrated Optimization of Cold Chain Logistics Inventory Allocation and Transportation Route Based on Dynamic Freshness[J]. *Systems Engineering*, 2021, 39(5): 69-80.
- [15] Wu Wentao, Claudio Beretta, Paul Cronje, et al. Environmental Trade-offs in Fresh-fruit Cold Chains by Combining Virtual Cold Chains with Life Cycle Assessment[J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113586.
- [16] 张福生, 何成芳, 朱鸿杰. 基于腐烂指数的草莓采后货架期预测模型[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(2): 320-323.
- [17] Xiao Yiyong, Zhao Qihong, Ikou Kaku, et al. Development of a Fuel Consumption Optimization Model for the Capacitated Vehicle Routing Problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(7): 1419-1431.
- [18] Wu Weitiao, Zhou Wei, Lin Yue, et al. A Hybrid Metaheuristic Algorithm for Location Inventory Routing Problem with Time Windows and Fuel Consumption[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 166: 114034.
- [19] Leng Longlong, Zhang Chunmiao, Zhao Yanwei, et al. Biobjective Low-Carbon Location-Routing Problem for Cold Chain Logistics: Formulation and Heuristic Approaches[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 122801.
- [20] 朱桂阳, 贾涛, 林峰, 等. 考虑缺货的两阶段腐败一体化库存一路径模型[J]. *工业工程与管理*, 2016, 21(5): 62-68.
Zhu Guiyang, Jia Tao, Lin Feng, et al. Integrated Inventory Routing Problem with In-transit and Retail Deterioration Allowing for Lost Sale[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2016, 21(5): 62-68.
- [21] 肖智豪, 胡志华, 朱琳. 求解冷链物流时间依赖型车辆路径问题的混合自适应大邻域搜索算法[J]. *计算机应用*, 2022, 42(9): 2926-2935.
Xiao Zhihao, Hu Zhihua, Zhu Lin. Hybrid Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm for Solving Time-dependent Vehicle Routing Problem in Cold Chain Logistics[J]. *Journal of Computer Applications*, 2022, 42(9): 2926-2935.
- [22] 孙波, 姜平, 周根荣, 等. 基于改进遗传算法的AGV路径规划[J]. *计算机工程与设计*, 2020, 41(2): 550-556.
Sun Bo, Jiang Ping, Zhou Genrong, et al. AGV Optimal Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm[J]. *Computer Engineering and Design*, 2020, 41(2): 550-556.
- [23] Qin Gaoyuan, Tao Fengming, Li Lixia. 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.
- [24] Wang Songyi, Tao Fengming, Shi Yuhe. Optimization of Location-Routing Problem for Cold Chain Logistics Considering Carbon Footprint[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(1): 86.