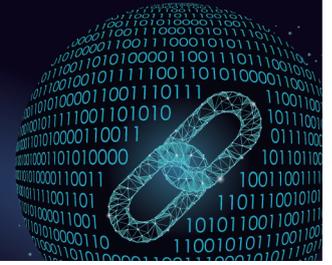




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



基于GELTR-WOA算法的多地点库存动态集成调拨

郑思宇, 黄敏, 蒋松辰, 尹明强, 张宇鑫, 孙秋野

引用本文:

郑思宇, 黄敏, 蒋松辰, 尹明强, 张宇鑫, 孙秋野. 基于GELTR-WOA算法的多地点库存动态集成调拨[J]. 控制与决策, 2024, 39(7): 2334–2344.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.2113>

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>

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>

考虑消费者缺货容忍的变质品订购与信用期策略研究

Ordering and trade credit strategies for deteriorating items considering consumer's shortage tolerance

控制与决策. 2021, 36(7): 1732–1742 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1552>

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>

库存水平影响需求下变质品订购、定价和保鲜技术投资的联合决策

Ordering, pricing and preservation technology investment decision for perishable items with inventory-level-dependent demand

控制与决策. 2020, 35(11): 2578–2588 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0195>

基于 GELTR-WOA 算法的多地点库存动态集成调拨

郑思宇¹, 黄敏^{1†}, 蒋松辰¹, 尹明强^{1,2}, 张宇鑫¹, 孙秋野¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 辽宁石油化工大学 信息与控制工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 为解决由区域配送中心和不同地点前置仓构成的多地点库存系统的动态调拨问题, 建立以最小化总成本为目标, 考虑紧急和预防纵向调拨、紧急横向转运的多地点库存动态集成调拨模型. 由于模型的非线性特征, 设计一种嵌入贪婪紧急横向转运修复策略的鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm embedding greedy emergency lateral transshipment repair strategy, GELTR-WOA). 通过基于现实场景产生的不同规模算例的数值实验, 验证算法的有效性. 最后, 探究加入紧急横向转运对系统运作成本的影响, 并分析单位缺货损失、单位运输成本等因素对调拨策略的影响, 从而为电商企业提供库存管理建议.

关键词: 前置仓; 多地点库存; 紧急横向转运; 动态集成调拨; 贪婪; 鲸鱼优化算法

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.2113

引用格式: 郑思宇, 黄敏, 蒋松辰, 等. 基于 GELTR-WOA 算法的多地点库存动态集成调拨 [J]. 控制与决策, 2024, 39(7): 2334-2344.

Multi-location inventory dynamic integrated allocation based on GELTR-WOA algorithm

ZHENG Si-yu¹, HUANG Min^{1†}, JIANG Song-chen¹, YIN Ming-qiang^{1,2}, ZHANG Yu-xin¹, SUN Qiu-ye¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: In order to solve the problem of dynamic allocation in the multi-location inventory system consisting of a regional distribution center and different front distribution centers, a multi-location inventory dynamic integrated allocation model is established to minimize the total cost, in which the vertical allocation strategy of emergency and prevention, and the emergency lateral transshipment strategy are introduced. Due to the nonlinear characteristics of the model, a whale optimization algorithm embedding greedy emergency lateral transshipment repair strategy (GELTR-WOA) is designed. The effectiveness of the GELTR-WOA is verified through numerical experiments on different scale examples generated from real scenarios. Finally, the influence of emergency lateral transshipment on system operation cost is explored, and the impact of model factors (including unit shortage loss, unit transportation cost, etc.) on the allocation strategy is also analyzed. Consequently, inventory management suggestions for e-commerce enterprises are obtained.

Keywords: front distribution center; multi-location inventory; emergency lateral transshipment; dynamic integrated allocation; greedy; whale optimization algorithm

0 引言

近年来,随着生活水平的提高,消费者对于便捷与效率的需求越来越高. 像京东、每日优鲜等电商企业通过结合前置仓 (front distribution center, FDC) 与区域配送中心仓 (regional distribution center, RDC) 形成二级仓储网络来完成商品的精准快速配送. 然而,

由于市场需求的波动性,如何分配各个仓库的库存以实现供需平衡成为企业亟需解决的问题^[1]. 随着 RDC 服务覆盖范围的扩大,二级仓储网络中不同地点多个 FDC 的协同运作使得仓储网络表现出“多地点”特征. 库存调拨是二级仓储网络运作的重要决策,如何制定合理的库存动态集成调拨策略对于企业

收稿日期: 2022-12-06; 录用日期: 2023-06-04.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3300900); 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目 (92267206); 国家自然科学基金重点项目 (62032013).

责任编辑: 刘民.

[†]通讯作者. E-mail: mhuang@mail.neu.edu.cn.

降低运营成本,实现供需平衡^[2-3]具有重要意义。

在二级仓储网络库存调拨问题的研究中,主要分为静态和动态调拨两种。有些学者^[3-7]针对静态调拨展开了研究。然而,由于实际需求的不确定性,应根据需求状况对调拨做出调整,大多数研究^[8-23]考虑的是动态调拨,以更好地满足客户需求。

在库存动态调拨中,存在上下级间的纵向调拨和同一层级间的横向转运两种调拨策略。根据库存调拨发生时间可分为紧急和预防两种调拨方式,即在观测到实际需求之前发生的为预防调拨;在需求实现后由于缺货发生的为紧急调拨。

在考虑纵向调拨策略的研究中,可根据调拨方式分为以下3类:紧急纵向调拨^[8],预防纵向调拨^[9]以及同时考虑紧急和预防纵向调拨^[10];在考虑横向转运策略的研究中,可分为以下3类:紧急横向转运^[11-13],预防横向转运^[14]以及同时考虑紧急和预防横向转运^[15-16];在纵向调拨和横向转运同时考虑的研究中,可将横向转运分为以下两种调拨策略:紧急横向转运和预防横向转运。其中,在纵向调拨和紧急横向转运的研究中,部分研究^[17-20]考虑了紧急纵向调拨,而Shi等^[21]考虑了预防纵向调拨;在纵向调拨和预防横向转运的研究中,Feng等^[22]考虑了紧急纵向调拨,Cheng等^[23]考虑了预防纵向调拨。

另外,只有部分研究^[3-5,23]为两地点仓库的调拨,大多数研究^[6-22]为更复杂的多地点仓库调拨。

现有研究中最多只集成了两种调拨策略,在纵向调拨和横向转运中只考虑了一种纵向调拨方式,没有同时考虑紧急横向转运、预防和紧急纵向调拨3种策略的研究。基于此,本文考虑上述3种调拨策略对多地点二级仓储网络的总成本带来的影响,围绕二级仓储网络的库存动态集成调拨问题展开研究。

本文的主要贡献为:1)同时考虑了预防纵向调拨、紧急纵向调拨和紧急横向转运3种调拨策略;2)建立了有紧急横向转运的库存动态集成调拨模型;3)由于模型的非线性及问题高复杂度,难以直接有效求解,设计了嵌入贪婪紧急横向转运修复策略的鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm embedding greedy emergency lateral transshipment repair strategy, GELTR-WOA)。

1 问题描述与模型建立

1.1 问题描述

电商企业建立的二级仓储网络如图1所示,上级为RDC,下级为若干个FDC。在该网络中由电商企业对不同仓库的调拨进行集中决策。供应商会向RDC

定期补货,RDC除了要满足其所在区域顾客的需求,还要向FDC进行纵向调拨,以使FDC满足其所在区域顾客的需求,同时FDC之间也会进行横向转运,从而可以更好地平衡各个FDC的库存。

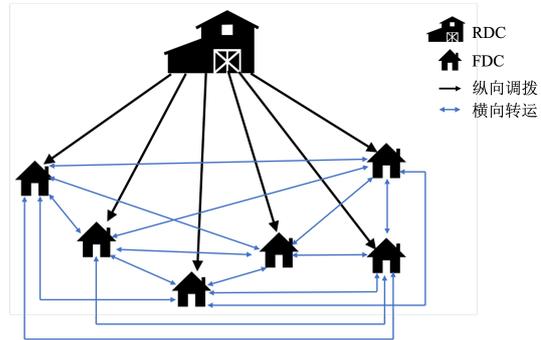


图1 二级仓储网络调拨示意

已知一个销售周期内RDC和FDC管辖区域的实际和预测需求,每天RDC据预测需求进行预防纵向调拨,各仓库据实际需求履约,当缺货时相继发生FDC间的紧急横向转运及RDC的紧急纵向调拨。

二级仓储网络的库存调拨和转运规则为以下4个步骤:1)预防纵向调拨:RDC根据预测需求向FDC进行纵向调拨。2)库存履约:每天清晨RDC收到供应商的补货,RDC和FDC使用现有库存量来满足其周围市场的实际需求。3)紧急横向转运:当某个FDC的库存量不足以满足实际需求时,其他FDC会通过紧急横向转运完成履约,此时会有部分顾客因没有足够的耐心等待而取消订单的情况^[24],可以认为造成了缺货损失。4)紧急纵向调拨:此时,如果其他FDC转运过来的库存量仍无法满足剩余实际需求,则RDC会进行紧急纵向调拨来直接履约顾客订单;如果RDC也没有足够的库存满足实际需求,则会产生缺货损失。

仓库在调拨分配库存时不仅受到库存水平的约束,还要受运输能力的约束,电商企业需要决策出每天RDC是否向各个FDC进行预防和紧急纵向调拨以及FDC之间是否进行紧急横向转运及它们的调拨量,从而使二级仓储网络的总成本达到最小。

1.2 模型建立

1.2.1 模型假设

- 1) 供应商向RDC供应的商品数量已知,不考虑订货产生的费用^[19]。
- 2) 不同FDC间的需求互不影响。
- 3) 各个区域顾客的需求在当天配送完成。直接履约的订单也在当天完成,当天未满足的需求自动取消,不会延期到第2天。
- 4) 在销售周期内不会出现商品过期或腐烂变质

的情况,即没有商品损耗.

1.2.2 符号说明

表1 参数符号及其含义

参数	含义
\mathcal{J}	各个FDC的集合
\mathcal{T}	销售周期的集合
I_t^R	RDC在第 t 天的初始库存
d_t^R	RDC所管辖区域在第 t 天的需求量
$d_t^{R'}$	RDC所管辖区域在第 t 天预测的需求量
I_{jt}	第 j 个FDC在第 t 天的初始库存
d_{jt}	第 j 个FDC所管辖区域在第 t 天的需求量
d_{jt}'	第 j 个FDC所管辖区域在第 t 天预测的需求量
r_t	第 t 天供应商向RDC的补货量
α_j	第 j 个FDC所管辖区域顾客放弃购买的比例
p	单位缺货损失成本
q_j	RDC向第 j 个FDC跨层级的单位紧急履约费用
q_{kj}	第 k 个FDC向第 j 个FDC的单位紧急履约费用
c_t	单位距离下单位商品的运输费用
c_s^R	RDC的单位持有成本
c_{sj}	第 j 个FDC的单位持有成本
l_j	RDC到第 j 个FDC的距离
I_j	第 j 个FDC的最大库存量
I^R	RDC的最大库存量
n	FDC的数量
T	一个销售周期的长度
M_j	RDC向第 j 个FDC可调拨的最大商品数
N_{kj}	第 k 个FDC向第 j 个FDC可调拨的最大商品数
决策变量	
w_{jt}	第 t 天RDC向第 j 个FDC的预防纵向调拨量
v_{kjt}	第 t 天第 k 个FDC向第 j 个FDC的转运量

1.2.3 模型构建

二级仓储网络的总成本由以下4部分组成.

1) 缺货损失费用.

由于顾客放弃购买而造成的缺货损失为

$$C_t^1 = \sum_{j \in \mathcal{J}} p[\alpha_j(d_{jt} - I_{jt} - w_{jt})^+]. \quad (1)$$

当RDC库存不足时造成的缺货损失为

$$C_t^2 = p\left(d_t^R - I_t^R + \sum_{j \in \mathcal{J}} \left[\lfloor (1 - \alpha_j)(d_{jt} - I_{jt} - w_{jt})^+ \rfloor - \sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} v_{kjt} \right]^+ \right). \quad (2)$$

2) 紧急履约费用.

FDC间紧急横向转运产生的紧急履约费用为

$$C_t^3 = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} q_{kj} v_{kjt}. \quad (3)$$

第 j 个FDC收到的紧急横向转运库存为

$$\sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} v_{kjt} = \min \left[\lfloor (1 - \alpha_j)(d_{jt} - I_{jt} - w_{jt})^+ \rfloor, \right.$$

$$\left. \sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} (I_{kt} + w_{kt} - d_{kt})^+ \right]. \quad (4)$$

RDC紧急纵向调拨产生的紧急履约费用为

$$C_t^4 = q_j \times \min \left((I_t^R - d_t^R)^+, \sum_{j \in \mathcal{J}} \left(\lfloor (1 - \alpha_j) \times (d_{jt} - I_{jt} - w_{jt})^+ \rfloor - \sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} v_{kjt} \right)^+ \right). \quad (5)$$

3) 运输费用.

RDC进行预防纵向调拨产生的运输费用为

$$C_t^5 = c_t \sum_{j \in \mathcal{J}} w_{jt} l_j. \quad (6)$$

4) 存储费用.

各仓库剩余库存量产生的存储费用为

$$C_t^6 = c_s^R (I_t^R + r_t - d_t^R)^+ + \sum_{j \in \mathcal{J}} c_{sj} \left(I_{jt} + w_{jt} - d_{jt} - \sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} v_{kjt} \right)^+. \quad (7)$$

本文以天为周期进行库存调拨,得出每天RDC和各个FDC库存量的更新方式为

$$I_{t+1}^R = \left(I_t^R + r_t - d_t^R - \sum_{j \in \mathcal{J}} \left(\lfloor (1 - \alpha_j) \times (d_{jt} - I_{jt} - w_{jt})^+ \rfloor - \sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} v_{kjt} \right)^+ - \sum_{j \in \mathcal{J}} w_{j,t+1} \right)^+, \quad (8)$$

$$I_{j,t+1} = \left((I_{jt} + w_{jt} - d_{jt})^+ - \sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} v_{kjt} \right)^+. \quad (9)$$

在紧急和预防纵向调拨中,集成有紧急横向转运的二级仓储网络的库存动态集成调拨模型如下:

$$\min C = \sum_{t \in \mathcal{T}} (C_t^1 + C_t^2 + C_t^3 + C_t^4 + C_t^5 + C_t^6). \quad (10)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq I_{t+1}^R \leq I^R, \forall t \in \mathcal{T}; \quad (11)$$

$$0 \leq I_{j,t+1} \leq I_j, \forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}; \quad (12)$$

$$0 \leq w_{jt} \leq M_j, \forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}; \quad (13)$$

$$0 \leq \sum_{j \in \mathcal{J}} w_{jt} \leq \min \left((I_t^R - d_t^{R'})^+, \sum_{j \in \mathcal{J}} (d_{jt}' - I_{jt})^+ \right), \forall t \in \mathcal{T}; \quad (14)$$

$$0 \leq v_{kjt} \leq N_{kj}, \forall k, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}; \quad (15)$$

$$0 \leq \sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} v_{kjt} \leq (I_{jt} + w_{jt} - d_{jt})^+, \forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}; \quad (16)$$

$$0 \leq \sum_{k \in \mathcal{J}: k \neq j} v_{kjt} \leq \lfloor (1 - \alpha_j)(d_{jt} - I_{jt} - w_{jt})^+ \rfloor,$$

$$\forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}; \quad (17)$$

$$w_{jt}, v_{kjt} \in R^+, \forall k, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}. \quad (18)$$

其中: 式(10)为目标函数, 最小化总成本; 式(11)、(12)为不能超过RDC和FDC的最大库存量; 式(13)、(14)为RDC的纵向调拨量不能超过最大运输能力, RDC预防纵向调拨量为其可调拨量与FDC的预测需求量中较小的值; 式(15)~(17)为FDC间紧急横向转运量不能超过最大运输能力, 同时第j个FDC的调出量不能超过其剩余库存量, 其他FDC向它的调入量不能超过其剩余的未满足实际需求; 式(18)表示两个决策变量, 均为正实数。

在本问题中, 随着FDC个数n和销售周期T的增加, 决策变量数(n²T)和约束条件个数((n² + 3n + 2)T)显著上升, 模型变得更加复杂。同时, 由于式(4)、(5)和(14)中的min函数以及式(1)、(2)、(4)、(5)、(8)和(17)中取整函数的存在, 使得其为非线性规划模型, 难以通过商业软件直接求解。因此本文设计了GELTR-WOA算法进行求解。

2 嵌入贪婪紧急横向转运修复策略的鲸鱼优化算法

由于鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)具有较高的勘探能力, 可在复杂度高的问题中更好地进行全局探测^[25]; 同时WOA算法也具有较快的开发和收敛性。有学者^[1]使用WOA算法求解有紧急横向转运的血液供应链库存管理问题时取得了较好的效果, 因此, 本文设计一种GELTR-WOA算法。

2.1 种群编码和初始化

本文采用实数编码, 每头鲸鱼个体对应一个解决方案。现将种群编码分为两部分, 一部分为每天RDC根据预测需求进行的预防纵向调拨量w_{jt}, 另一部分为每天根据实际需求FDC间紧急横向转运的调出量v_{kjt}。第1部分编码长度为nT, 实数编码范围为[0, M_j]; 第2部分编码, 本文将转运中调出库存设为正值, 调入库存设为负值, 故其长度为n(n-1)T/2, 该段位置编码范围为[-N_{kj}, N_{kj}]。因此, 鲸鱼个体位置的总长度为n(n+1)T/2。

鲸鱼种群的初始化为在上述编码范围内随机生成一组种群规模为pol的初始种群。

2.2 种群位置更新

在鲸鱼优化算法中假设有D维搜索空间, 鲸鱼种群W = {X₁, X₂, ..., X_N}由N头鲸鱼组成, 第i头鲸鱼的位置为X_i = [X_i¹, X_i², ..., X_i^D], X_i^d表示第i头鲸鱼在第d维的位置。每次迭代都会生成一个随

机值p, 每头鲸鱼根据p和A_i^d值的不同选择不同的方式迭代更新位置从而逼近猎物, 其中A_i^d表示第i头鲸鱼在第d维的位置更新系数。

1) 采用收缩包围猎物的方式更新。

当p < 0.5且|A_i^d| < 1时, 鲸鱼在当前的最优解附近更新种群位置, 即通过产生收缩圆收缩包围猎物, 更新方式如下所示:

$$X_i^d(m+1) = X_{best}^d(m) - A_i^d D_{1,i}^d, \quad (19)$$

$$D_{1,i}^d = \|C_i^d X_{best}^d(m) - X_i^d(m)\|, \quad (20)$$

$$A_i^d = 2ar - a, \quad (21)$$

$$C_i^d = 2r. \quad (22)$$

其中:m表示当前的迭代次数, X_i^d为更新后的位置, X_{best} = [X_{best}¹, X_{best}², ..., X_{best}^D]为目前得到的最优解的位置, D_{1,i}^d为收缩圆的半径, 控制参数a = 2 - 2m/m_{max}在迭代过程中从2到0线性递减, m_{max}为最大迭代次数, r是[0, 1]区间中的随机变量且A_i^d ∈ [-a, a]。

2) 采用随机搜索猎物的方式更新。

当p < 0.5且|A_i^d| ≥ 1时, 鲸鱼在随机选择的位置附近更新种群位置, 即随机搜索猎物, 更新方式为

$$X_i^d(m+1) = X_{rand}^d(m) - A_i^d D_{1,i}^d, \quad (23)$$

$$D_{1,i}^d = \|C_i^d X_{rand}^d(m) - X_i^d(m)\|, \quad (24)$$

其中X_{rand}是随机一头鲸鱼对应的随机位置。

3) 采用螺旋更新机制的方式更新。

当p ≥ 0.5时, 鲸鱼采用螺旋更新机制的方式更新种群位置, 更新方式为

$$X_i^d(m+1) = D_{2,i}^d \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_i^d(m), \quad (25)$$

$$D_{2,i}^d = \|X_{best}^d(m) - X_i^d(m)\|. \quad (26)$$

其中:b为对数螺旋形状的常数, l为[-1, 1]之间的随机数, D_{2,i}^d表示当前的鲸鱼到最优解的距离。

2.3 修复策略

在鲸鱼种群进行初始化或更新之后会有一些不符合最大库存和现有库存量约束的解产生。本文在以下两小节中分别对不满足预防纵向调拨量约束和紧急横向转运量约束的解进行修复。

2.3.1 对预防纵向调拨量的修复

预防纵向调拨量除受运输能力约束外还存在以下两种约束: 1) 每天运输到FDC的预防纵向调拨量加上当天该FDC的初始库存量不能超过其最大库存; 2) 每天RDC的预防纵向调拨量加上当天RDC所管辖区域的预测需求量不能超过其初始库存。

当不满足约束1)时, 在考虑运输能力限制的同

时,将预防纵向调拨量在0和当前FDC最多可容纳的库存量之间随机选取一个实数值来替换原来的值;当不满足约束2)时,在考虑运输能力限制的同时,将当天运输到FDC的预防纵向调拨量按原来的分配比例瓜分RDC最多可调拨的量并乘以0~1之间的随机数.

2.3.2 基于贪婪转运策略的修复

紧急横向转运量除了受运输能力的约束外还受FDC剩余库存量的限制.因此,为了满足上述约束的同时获得更低的转运成本,现设计基于贪婪转运策略的修复如下.

根据每天各个FDC的缺货情况将其分为两个集合,即缺货的FDC集合O和有剩余库存的FDC集合S.此时只需决策S中FDC向O中FDC的转运量即可.将集合O中的各个FDC按照缺货量由多到少进行排序,然后按照集合S中的各个FDC到集合O中第j个FDC的单位履约费用由低到高进行排序,并按照该顺序进行紧急横向转运.当集合O中第j个FDC不再有未满足的需求时,便按照上述顺序对下一个FDC进行转运.相较于一般的转运规则(即每次转运都让剩余量最多的FDC完成),上述转运规则采用贪婪策略,每次都选取履约费用最低的FDC完成紧急横向转运.

基于贪婪转运策略修复的过程如下:

贪婪转运策略的修复	
输入:	q_{kj} 和履约订单需求后各个FDC的剩余库存量 I_{jt}
输出:	FDC之间的紧急横向转运量 v_{kjt}
1)	for I_{jt} 中的各个库存量 do
2)	if $I_{jt} > 0$ then
3)	$I_{kt} \leftarrow I_{jt}$
4)	else $I_{jt} < 0$
5)	$I_{jt} \leftarrow -I_{jt}$
6)	end if
7)	end for
8)	对 I_{jt} 降序排列,并索引其排序号 o
9)	for $o = 1$ to length(I_{jt}) do
10)	while $I_{jt} > 0$ do
11)	按 q_{kj} 对 I_{kt} 升序排列,并索引其排序号 s
12)	for $s = 1$ to length(I_{kt}) do
13)	$v_{kjt} \leftarrow \min(I_{kt}, I_{jt}), I_{jt} \leftarrow I_{jt} - v_{kjt}$ $I_{kt} \leftarrow I_{kt} - v_{kjt}$
14)	end for
15)	end while
16)	end for
17)	其他紧急横向转运量 $v_{kjt} = 0$

经过上述基于贪婪转运策略的修复,便可保证紧急横向转运量均能满足所有的约束条件.

2.4 适应值函数

本文直接以模型中的目标函数(即式(10))作为算法的适应值函数.算法中将适应值最小的个体作为最优个体,最小的适应值作为最优值.

2.5 算法终止条件

在本算法中,以最大迭代次数作为算法的终止条件,当算法的循环次数达到最大迭代次数 m_{max} 时,算法终止.

2.6 算法总流程

GELTR-WOA算法的框架流程如图2所示.

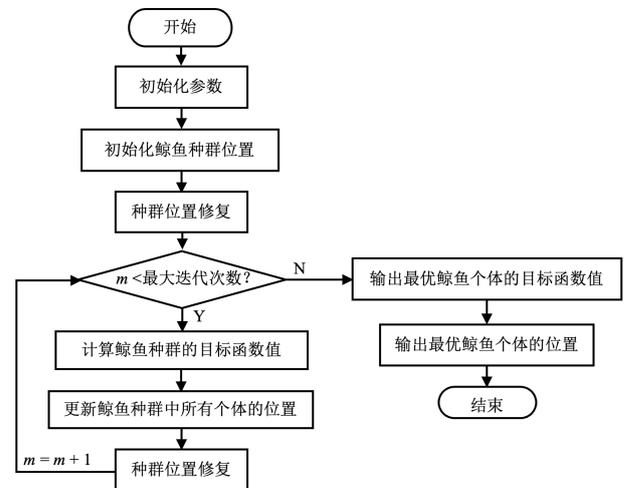


图2 GELTR-WOA算法流程

3 实验分析

3.1 算例设计

本文根据京东快递在沈阳市的仓库及快递网点的位置信息生成5组不同规模的二级仓储网络,分别为6、8、10、20和40个FDC节点.通过查询得到京东天猫店的物流配送中每单存储费为0.2~5元,物流费为1~10元,缺货损失费为0.5~10元.本文据此生成实验所需的各个成本.本文根据京东数据生成各个仓库的初始库存量、最大库存量以及供应商的补货量,基于Gamma分布随机生成各个仓库7天的实际需求,通过加入均值为0、方差为0.01的高斯噪声的方式生成预测需求.另外,将 α 设置为0.1~0.5之间的随机值.

本文设置RDC向FDC纵向调拨和FDC之间紧急横向转运的最大运输能力分别为200和100.上述算法通过Matlab R2021a编程实现,使用M1 Pro CPU 3.2 GHz, RAM 16 GB进行求解.

通过实验得出,GELTR-WOA算法求解的最优参数设置为:鲸鱼种群规模和最大迭代次数分别为30

和1 000;对数螺旋形状的常数 b 设置为1;在鲸鱼通过泡泡网围攻猎物的阶段,分别有50%的概率选择收缩包围机制和螺旋更新机制。

3.2 算法性能分析

为了对比算法的性能,验证GELTR-WOA算法的有效性,本节将GELTR-WOA算法与基于普通转运规则的WOA算法以及嵌入贪婪紧急横向转运策略的遗传算法(genetic algorithm embedding greedy emergency lateral transshipment strategy, GELTR-GA)进行对比。将3种算法的种群规模和最大迭代次数分别设置为30和1 000,并将模型的参数均设置为相同的数值。本文主要从求解结果的最大值 s_{max} 、最小值 s_{min} 、平均值 s_{avg} 、方差 s_{var} 和算法的运行时间 T_{tol} (单位:s)这5个性能指标进行比较,所得结果如表2所示。

表2 不同规模下3种算法的性能比较

规模	算法	s_{max}	s_{min}	s_{avg}	s_{var}	T_{tol}/s
6	GELTR-WOA	5186.4	5062.2	5113.9	744.2	272.5
	WOA	5274.2	5076.2	5130.0	1565.1	235.4
	GELTR-GA	5326.9	5152.1	5239.1	1261.1	296.2
8	GELTR-WOA	6842.0	6677.3	6756.0	1557.5	371.2
	WOA	6958.3	6708.5	6798.9	2946.5	340.8
	GELTR-GA	7060.6	6761.4	6918.1	3465.8	471.2
10	GELTR-WOA	8678.5	8364.2	8497.2	4457.9	363.2
	WOA	8714.4	8386.6	8546.4	4651.4	324.6
	GELTR-GA	8759.8	8296.4	8612.9	6803.7	563.9
20	GELTR-WOA	14183.9	13487.2	13711.0	11009.6	1087.1
	WOA	14304.8	13761.8	14004.0	15439.2	961.7
	GELTR-GA	15304.6	14283.4	14772.0	48126.3	1814.9
40	GELTR-WOA	27651.3	26582.2	26920.0	32570.2	7272.7
	WOA	28177.9	27132.9	27864.0	38782.6	6642.4
	GELTR-GA	29898.1	27639.0	28931.0	216893.4	21785.2

显然,5种规模算例下GELTR-WOA算法的最大值、最小值、平均值和方差均优于另外两种算法,虽然运行时间比WOA算法长,但差距不大,因此,GELTR-WOA算法对求解本文模型具有更好的性能。

另外,为了验证高斯噪声方差大小是否对算法性能有影响,将其分别设置为0.01、0.04、0.07和0.1,在规模为20的算例下进行求解。同样,从上述5个性能指标对这3种算法进行比较,如表3所示。

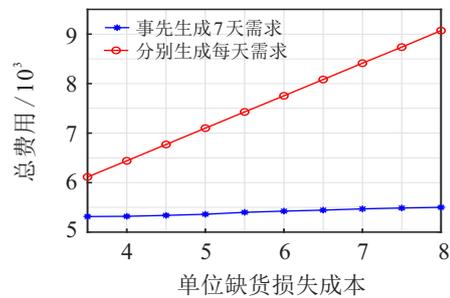
随着高斯噪声方差值的增大,GELTR-WOA算法求解结果的最大值、最小值、平均值和方差均优于另外两种算法。虽然其运行时间比WOA算法略高,但是比GELTR-GA算法短很多。由此说明,GELTR-WOA算法对求解该问题是有效的。

表3 不同高斯噪声方差下3种算法的性能比较

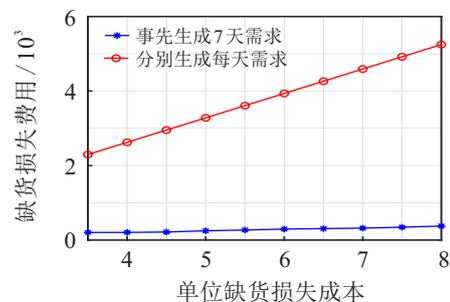
方差	算法	s_{max}	s_{min}	s_{avg}	s_{var}	T_{tol}/s
0.01	GELTR-WOA	14183.9	13487.2	13711.0	11009.6	1087.1
	WOA	14304.8	13761.8	14004.0	15439.2	961.7
	GELTR-GA	15304.6	14283.4	14772.0	48126.3	1814.9
0.04	GELTR-WOA	14301.4	13656.7	13904.0	19537.8	1057.7
	WOA	14561.8	13891.6	14252.0	37477.1	961.5
	GELTR-GA	15508.8	14581.3	15108.0	46323.4	1788.7
0.07	GELTR-WOA	14069.8	13576.1	13873.0	11981.0	1053.3
	WOA	14503.7	13945.8	14229.0	22494.3	938.5
	GELTR-GA	15518.7	14574.5	15109.0	50589.4	1796.9
0.1	GELTR-WOA	14047.1	13534.4	13873.0	8585.8	1057.1
	WOA	14544.1	13835.5	14280.0	27895.6	936.9
	GELTR-GA	15831.1	14295.6	15145.0	62366.0	1798.9

3.3 需求生成方式对结果的影响

本文采用事先生成一个销售周期(7天)的需求方式,根据未来几天的需求变化安排当天的决策,最终得到的是7天总成本最小的结果;而先后分别生成每天的需求进行求解是短视的,不会为将来需求的变化提前部署安排,得到的是使当天成本最小的结果。改变单位缺货损失成本,对比两种需求生成方式下总费用和缺货损失费用的变化如图3所示。



(a) 不同单位缺货损失成本下两种生成需求方式对总费用的影响



(b) 不同单位缺货损失成本下两种生成需求方式对缺货损失费用的影响

图3 两种生成需求方式下的总费用和缺货损失费用

由图3可以发现,随着单位缺货损失成本的增加,分别生成每天需求的方式下产生的缺货损失费用和总费用很大且增长很快,由此可见,事先生成7天的

需求方式能更好地减少缺货损失成本.

3.4 有无紧急横向转运的对比分析

本文选用6节点FDC规模的算例对有无紧急横向转运两种情况下二级仓储网络的各个费用及调拨量进行比较分析.通过GELTR-WOA算法求解得到的结果如表4所示.

表4 有无紧急横向转运两种情况的结果对比

费用及调拨量	有紧急横向转运	无紧急横向转运
总成本/元	5118.3	5246.2
存储费用/元	1116.9	1141.5
运输费用/元	3798.1	3632.2
缺货损失费用/元	59.2	50.1
紧急履约费用/元	144.1	422.4
紧急纵向调拨量/箱	244.5	368.5

由表4可见,无紧急横向转运时的总成本较大;有紧急横向转运时通过增多预防纵向调拨,使FDC可以进行更多的紧急横向转运,增大了运输费用,但由于紧急横向转运的单位履约费用更少,因此大大降低了紧急履约费用,也减少了紧急纵向调拨量和存储费用.

3.5 销售周期长度对预防性调拨策略的影响

将销售周期的长度增加到14天进行求解,与销售周期为7天时的求解结果进行对比,得到销售周期长度对预防纵向调拨量的影响,如图4所示.

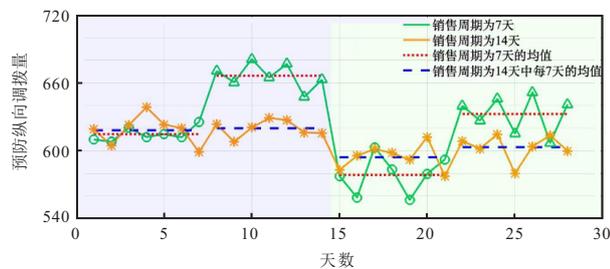


图4 不同销售周期对预防纵向调拨量的影响

图4中:圆圈部分是前7天为一个销售周期计算出来的预防纵向调拨量,三角部分是后7天为一个销售周期,星号部分是以14天为一个销售周期,点线是销售周期为7天时的预防纵向调拨量的均值,虚线是销售周期为14天中每7天的预防纵向调拨量的均值.

从整体变化趋势看:以7天为一个销售周期时,后一周期的预防纵向调拨量有较大幅度的提升;以14天为一个销售周期时的波动不大.由此可见:销售周期的长度会对每天的预防纵向调拨量产生影响;从均值角度看,由于以销售周期为7天进行计算时不会提前为之后的需求部署安排库存,在后7天时需要调拨更多库存量来满足需求.因此,当销售周期变短时,前后两个周期的平均预防纵向调拨量的差距也呈

现出变大的趋势.

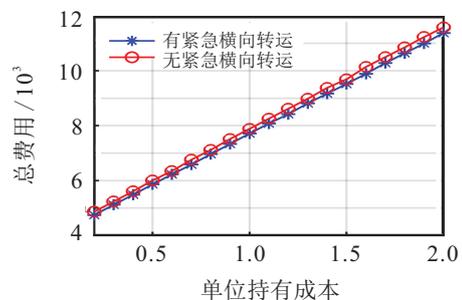
综上所述,当销售周期过短时,会使前后两周期的预防纵向调拨量的波动很大;当销售周期过长时波动不明显,然而当需求变化过大时不会及时作出调整.因此,电商企业需要根据具体的销售状况确定合适的销售周期长度.

3.6 问题参数分析

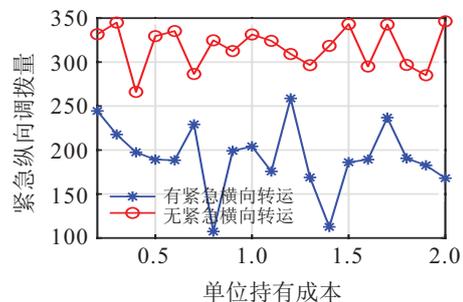
本文选用6节点FDC规模的算例分别计算以下4种单位成本的变化对总成本及调拨决策的影响,从而对电商企业的调拨决策提供建议.

3.6.1 单位持有成本对调拨策略的影响

将单位持有成本从0.2元/箱以0.1的单位长度增长到2元/箱的过程中,总费用及紧急纵向调拨量的变化情况如图5所示.



(a) 两种情况总费用的变化



(b) 两种情况紧急纵向调拨量的变化

图5 对总费用和紧急纵向调拨量的影响(1)

随着单位持有成本的改变,其他4种费用的变化情况如图6所示.

在图5、图6中,随着单位持有成本的增加,有紧急横向转运时通过增多预防纵向调拨、紧急纵向调拨以及紧急横向转运,在降低剩余库存的同时很大程度上减少了缺货损失.从总费用角度看,有紧急横向转运的情况在二级仓储网络调拨中具有一定的优势.

3.6.2 单位缺货损失成本对调拨策略的影响

将单位缺货损失成本从1元/箱以0.5的单位长度增长到10元/箱的过程中,总费用及紧急纵向调拨量的变化情况如图7所示.

随着单位缺货损失成本的改变,其他4种费用的变化情况如图8所示.

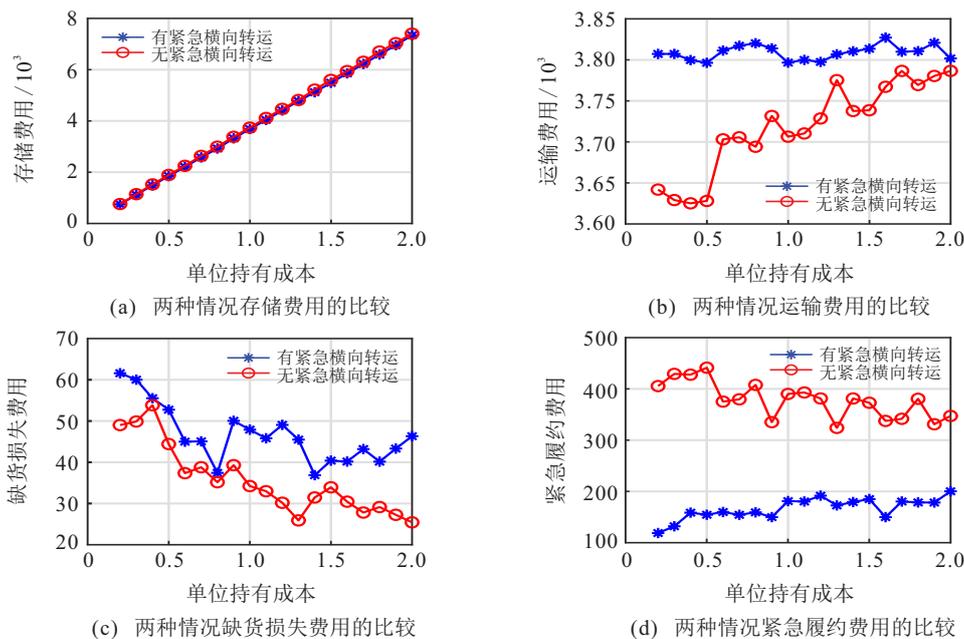


图6 对4种费用的影响(1)

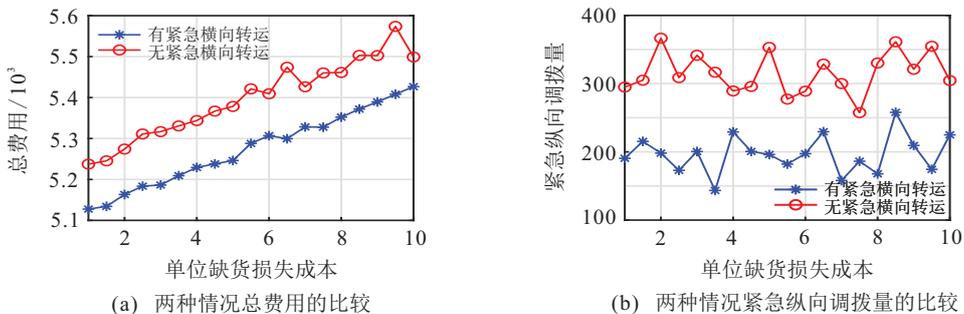


图7 对总费用和紧急纵向调拨量的影响(2)

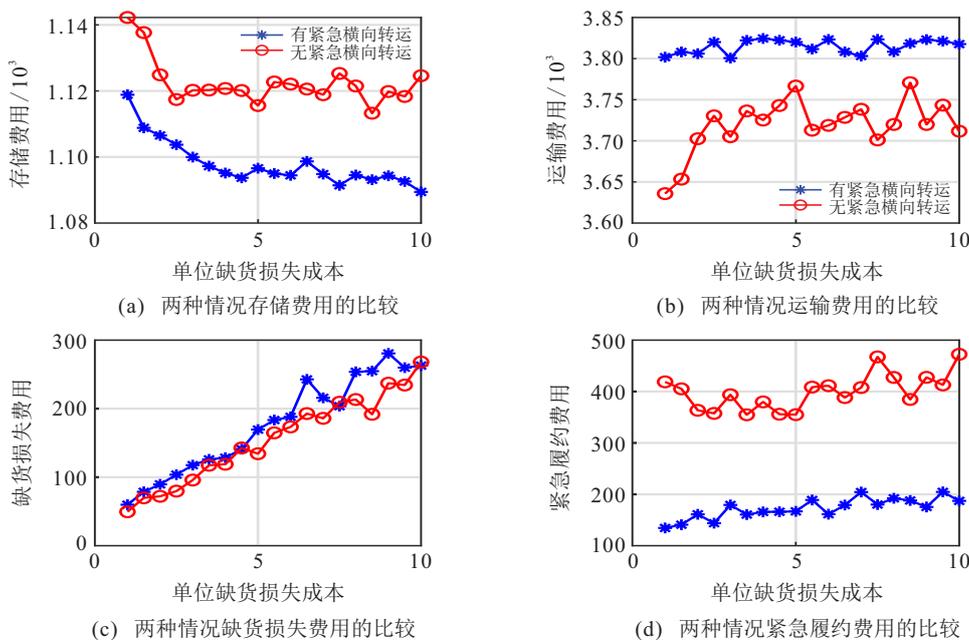


图8 对4种费用的影响(2)

在图7、图8中,由于单位缺货损失成本增加,通过进行更多的预防纵向调拨以满足FDC需求,尽可能避免缺货损失,大大降低了RDC的存储费用。在

有紧急横向转运的情况下,通过紧急横向转运平衡FDC间的库存,减少订单损失的同时降低了FDC的存储费用。随着单位缺货损失成本的增多,两种情况

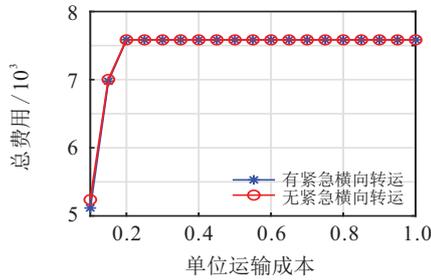
总费用的差距变大,体现了紧急横向转运的优势.

3.6.3 单位运输成本对调拨策略的影响

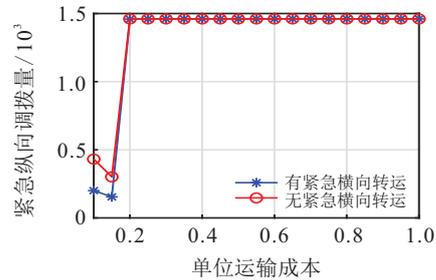
将单位运输成本从0.1元/箱以0.05的单位长度增长到1元/箱的过程中,总费用及紧急纵向调拨量的

变化情况如图9所示.

随着单位运输成本的改变,其他4种费用的变化情况如图10所示.

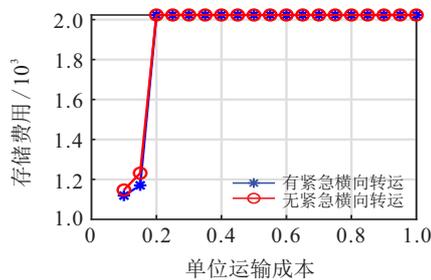


(a) 两种情况总费用的比较

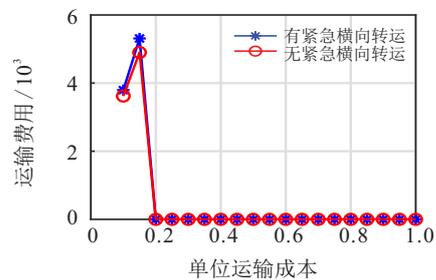


(b) 两种情况紧急纵向调拨量的比较

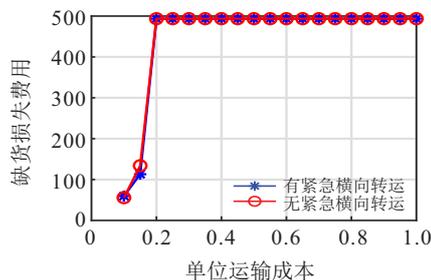
图9 对总费用和紧急纵向调拨量的影响(3)



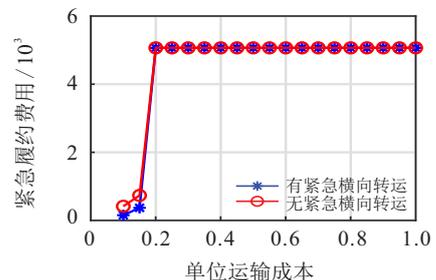
(a) 两种情况存储费用的比较



(b) 两种情况运输费用的比较



(c) 两种情况缺货损失费用的比较



(d) 两种情况紧急履约费用的比较

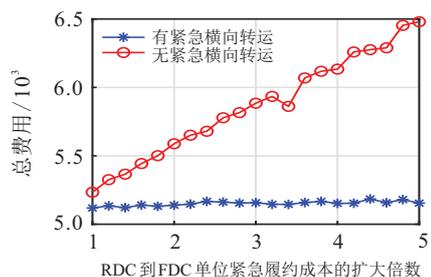
图10 对4种费用的影响(3)

在图9、图10中,单位运输成本的增加会直接影响预防纵向调拨量,因此,当单位运输成本增大到一定程度时,两种情况下都不会再进行预防纵向调拨,即此时的运输费用为零.此时各个FDC在用完初始库存后,两种情况下均只能通过紧急纵向调拨对订单直接履约,有紧急横向转运的调拨策略变得与没有紧

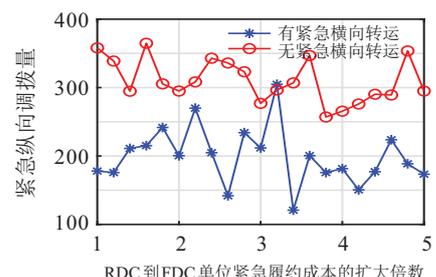
急横向转运的情况相同.

3.6.4 单位紧急履约成本对调拨策略的影响

将从RDC向FDC紧急纵向调拨的单位履约成本由1倍扩大到5倍的过程中,总费用及紧急纵向调拨量的变化情况如图11所示.随着单位运输成本的改变,其他4种费用的变化情况如图12所示.



(a) 两种情况总费用的比较



(b) 两种情况紧急纵向调拨量的比较

图11 对总费用和紧急纵向调拨量的影响(4)

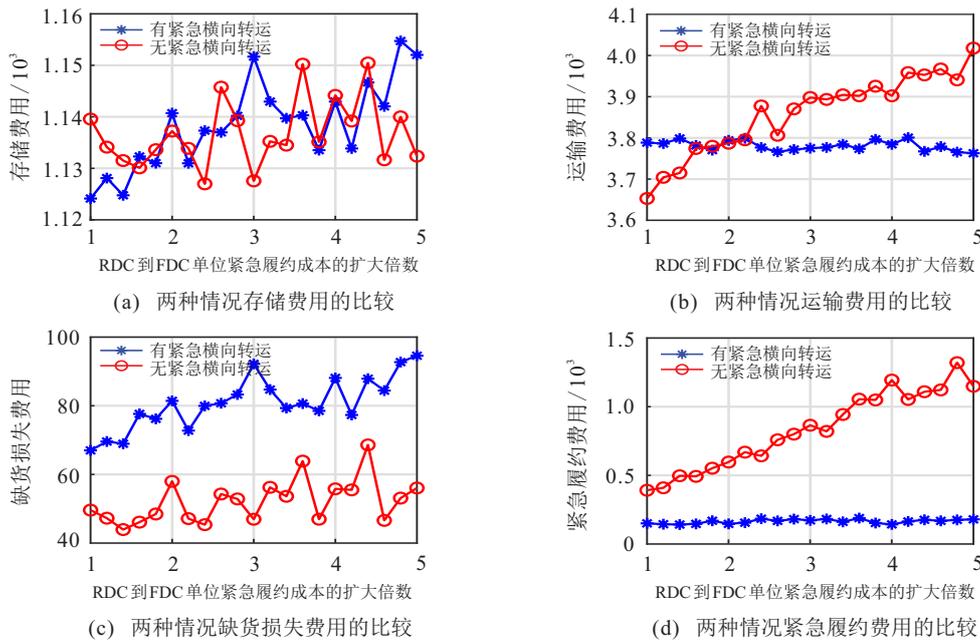


图 12 对4种费用的影响(4)

在图11、图12中,随着纵横向单位紧急履约成本的差距变大,有紧急横向转运的情况下,RDC向各个FDC的预防纵向调拨量减少,使得缺货损失增加,从而使RDC和FDC的剩余库存量增加,导致总的存储费用增加.增大FDC之间的紧急横向转运量,减少紧急纵向调拨量,使得紧急履约费用上升不明显,因此,有紧急横向转运情况下的总成本更少.

通过有无紧急横向转运两种情况下的总成本可以看出,当二级仓储网络系统的纵横向单位紧急履约成本的差距越大时,紧急横向转运越有优势.

4 结论

本文针对二级仓储网络的库存动态集成调拨问题,建立了在紧急和预防纵向调拨的基础上有紧急横向转运的库存动态集成调拨模型,由于模型的非线性和较高的复杂度,设计了GELTR-WOA算法,并在不同规模算例下验证了算法的有效性.通过对有无紧急横向转运两种情况求解并比较,得出有紧急横向转运时二级仓储网络的总成本总是不高于无紧急横向转运时的总成本.同时分析了改变各个单位成本对调拨决策的影响并得到如下管理启示:

1)单位持有成本很高时,电商企业可以加大预防纵向调拨量来降低RDC的存储费用,增加紧急横向转运以降低各个FDC的存储费用,同时会减少缺货损失,从而可以按时按量地实现对客户的配送服务;

2)单位缺货损失成本很高时,电商企业可以在满足RDC需求的基础上加大预防纵向调拨以及紧急横向转运和紧急纵向调拨,从而可以更好地解决供需不

平衡的问题,并满足配送时效,减少缺货损失的同时也可减少存储费用;

3)单位运输成本很高时,电商企业可以取消预防纵向调拨,直接通过跨层级履约来满足客户的需求;

4)纵横向的单位紧急性履约成本差距很大时,电商企业可以适当地增大存储量,尽可能减少紧急纵向调拨,更多地通过紧急横向转运进行履约,在保证配送时效的同时降低总成本.

参考文献(References)

[1] 李凤月, 齐小刚, 宋卫星, 等. 基于混合果蝇优化算法的选址-库存联合优化策略[J]. 控制与决策, 2022, 37(9): 2343-2352. (Li F Y, Qi X G, Song W X, et al. Location-inventory joint optimization strategy based on hybrid fruit fly optimization algorithm[J]. Control and Decision, 2022, 37(9): 2343-2352.)

[2] Torabi S A, Hassini E, Jeyhoonian M. Fulfillment source allocation, inventory transshipment, and customer order transfer in e-tailing[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 79: 128-144.

[3] 万鹏, 戴守峰, 张吉善, 等. 两次订购机会下考虑需求信息更新的横向转运库存策略[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(4): 932-945. (Wan P, Ji S F, Zhang J S, et al. Lateral transshipment inventory strategy in two-retailer supply chain with two ordering opportunities and demand information update[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2021, 41(4): 932-945.)

[4] 刘露, 李勇建. 竞争市场中的库存共享实施策略[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(3): 635-646. (Liu L, Li Y J. The implementation strategy of inventory sharing in competitive sales market[J].

- Systems Engineering—Theory & Practice, 2019, 39(3): 635-646.)
- [5] Feng P P, Wu F, Fung R Y K, et al. The order and transshipment decisions in a two-location inventory system with demand forecast updates[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 135: 53-66.
- [6] Feng X H, Moon I, Ryu K. Warehouse capacity sharing via transshipment for an integrated two-echelon supply chain[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 104: 17-35.
- [7] Zhou Z H, Wang X H. Replenishment and transshipment in periodic-review systems with a fixed order cost[J]. European Journal of Operational Research, 2023, 307(3): 1240-1247.
- [8] 刘洋, 金懋, 李茂斌, 等. 电商大规模库存调拨策略研究[J]. 中国储运, 2020(9): 109-111.
(Liu Y, Jin M, Li M B, et al. Research on large-scale inventory allocation strategy of e-commerce[J]. China Storage & Transport, 2020(9): 109-111.)
- [9] Li J X, Toriello A, Wang H, et al. Dynamic inventory allocation for seasonal merchandise at dillard's[J]. INFORMS Journal on Applied Analytics, 2021, 51(4): 297-311.
- [10] Lim Y F, Jiu S, Ang M. Integrating anticipative replenishment allocation with reactive fulfillment for online retailing using robust optimization[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2021, 23(6): 1616-1633.
- [11] Shokouhifar M, Sabbaghi M M, Pilevari N. Inventory management in blood supply chain considering fuzzy supply/demand uncertainties and lateral transshipment[J]. Transfusion and Apheresis Science, 2021, 60(3): 103103.
- [12] Zelibe S C, Bassey U N. Two-echelon inventory model with service consideration and lateral transshipment[J]. Wseas Transactions on Systems, 2021, 20: 108-123.
- [13] Bhatnagar R. The joint transshipment and production control policies for multi-location production/inventory systems[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 275(3): 957-970.
- [14] Meissner J, Senicheva O V. Approximate dynamic programming for lateral transshipment problems in multi-location inventory systems[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 265(1): 49-64.
- [15] Hochmuth C A, Köchel P. How to order and transship in multi-location inventory systems: The simulation optimization approach[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 140(2): 646-654.
- [16] Lee Y H, Jung J W, Jeon Y S. An effective lateral transshipment policy to improve service level in the supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2007, 106(1): 115-126.
- [17] 万鹏, 戴守峰, 宋乃绪. 具有随机缺陷率产品的多点转运库存优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(9): 2561-2572.
(Wan P, Ji S F, Song N X. Multi-location inventory optimization model with lateral transshipment for random defect rate items[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(9): 2561-2572.)
- [18] Gerrits B, Topan E, van der Heijden M C. Operational planning in service control towers-heuristics and case study[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 302(3): 983-998.
- [19] 徐小峰, 孙玉萍, 林姿汝. 缺货情形下轴辐式库存的纵横向协作调拨[J]. 运筹与管理, 2021, 30(10): 113-119.
(Xu X F, Sun Y P, Lin Z R. Vertical and horizontal cooperative allocation based on hub-and-spoke inventory in case of shortage[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(10): 113-119.)
- [20] 范雨涵, 宋鑫, 高银萍, 等. 考虑补货优先级的服装横向转运库存优化[J]. 上海海事大学学报, 2022, 43(1): 84-90.
(Fan Y H, Song X, Gao Y P, et al. Inventory optimization of apparel lateral transshipment considering replenishment priority[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2022, 43(1): 84-90.)
- [21] Shi X F, Wang H Y, Xue W L. Allocation rules for joint replenishment and inventory sharing via transshipment[J]. Procedia Computer Science, 2019, 159: 1872-1879.
- [22] Feng P P, Fung R Y K, Wu F. Preventive transshipment decisions in a multi-location inventory system with dynamic approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 104: 1-8.
- [23] Cheng L H, Guo X L, Li X X, et al. Data-driven ordering and transshipment decisions for online retailers and logistics service providers[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 161: 102684.
- [24] 郑长征, 刘志学, 左晓露. 基于购买行为的随机生命周期易逝品库存策略[J]. 控制与决策, 2012, 27(1): 28-34.
(Zheng C Z, Liu Z X, Zuo X L. Optimal policies for deteriorating inventory problems based on purchasing behavior[J]. Control and Decision, 2012, 27(1): 28-34.)
- [25] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.

作者简介

郑思宇(2000—), 女, 硕士生, 从事供应链网络设计和库存调拨的研究, E-mail: xgzhengsiyu@163.com;

黄敏(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 从事企业物流与供应链管理、现代集成制造系统等研究, E-mail: mhuang@mail.neu.edu.cn;

蒋松辰(1996—), 男, 博士生, 从事数据驱动的供应链及服务网络规划的研究, E-mail: neu_jiangsongchen@foxmail.com;

尹明强(1989—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事物流供应链网络设计、随机规划方法、计算智能等研究, E-mail: yinmingqiang2387@sina.com;

张宇鑫(1996—), 男, 博士生, 从事物流网络设计与智能优化的研究, E-mail: 1368103299@qq.com;

孙秋野(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事能源互联网的建模与优化运行等研究, E-mail: sunqiuye@mail.neu.edu.cn.