



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402446

引用格式:赵文丹,杨绪清.前置仓补货模式下双渠道供应链库存优化[J].科学技术与工程,2025,25(9):3739-3748.

Zhao Wendan, Yang Xuqing. Inventory optimization of dual channel supply chain under pre warehouse replenishment mode[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3739-3748.

自动化技术、计算机技术

前置仓补货模式下双渠道供应链库存优化

赵文丹, 杨绪清

(沈阳化工大学信息工程学院, 沈阳 110142)

摘要 以三级多产品双渠道供应链为例,探讨了在随机需求下的供应链库存控制问题。研究建立了一个以“单制造商-双分销商-双零售商-双客户”为基础的独立控制、信息共享及前置仓补货模式的双渠道供应链仿真模型。在节点企业中,采用了Pull/Push策略进行订货决策,并利用信息熵来衡量节点的不确定性。最后,使用鲸鱼优化算法来调整仿真模型中的库存控制参数。结果显示,在中断情况下,前置仓补货模式能够将中断渠道客户满意度提高80%。而鲸鱼优化算法则能在保证客户满意度的同时,控制总成本,降低供应链系统的不确定性。

关键词 前置仓; 双渠道供应链; 鲸鱼优化算法; Pull/Push策略; 信息熵

中图分类号 TP18; **文献标志码** A

Inventory Optimization of Dual Channel Supply Chain under Pre Warehouse Replenishment Mode

ZHAO Wen-dan, YANG Xu-qing

(College of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

[Abstract] Taking a three-level, multi product, and dual channel supply chain as an example, the inventory control problem in the supply chain under stochastic demand was explored. A dual channel supply chain simulation model was established based on the independent control, information sharing, and pre warehouse replenishment model of “single manufacturer-dual distributor-dual retailer-dual customer”. In node enterprises, the Pull/Push strategy was adopted for ordering decisions, and information entropy was used to measure the uncertainty of nodes. Finally, the whale optimization algorithm was used to adjust the inventory control parameters in the simulation model. The results show that in the case of interruption, the pre warehouse replenishment mode can increase customer satisfaction in the interrupted channel by 80%. The whale optimization algorithm can ensure customer satisfaction while controlling total costs and reducing uncertainty in the supply chain system.

[Keywords] pre warehouse; dual channel supply chain; whale optimization algorithm; Pull/Push strategy; information entropy

随着全球贸易的发展,供应链网络结构变得日益复杂,多级供应链网络结构已成为库存管理的主要形式。客户满意度和供应链库存成本是供应链绩效的关键指标^[1]。为了适应需求的变化,供应链各节点企业通常采取大规模库存以确保客户满意度。然而,这种方式会带来高昂的库存持有成本,影响供应链绩效。因此,如何在保证客户需求的同时控制供应链的运营成本是诸多学者的研究热点。如文献[2]通过深度学习模型分析库存短缺问题,确定了各个时段的库存补充量,以最大限度地降低产品采购成本和储存成本。文献[3]在不确定需求

下建立了供应链网络总成本和碳排放量的多目标模型,并利用Epsilon约束方法进行精确求解,以最大程度降低供应链网络运作总成本和碳排放量。

与传统单渠道供应链不同,双渠道供应链的运作模式更复杂,不同渠道在运作过程中的相互作用会直接影响到整个供应链网络的绩效^[4]。文献[5]研究了双渠道供应链中信息共享和非信息共享下供应链成员的决策问题。文献[6]分析了线上线下双渠道在随机需求下的协调机制,通过Stackelberg博弈分析了最优运营决策。文献[7]就信息共享问题分析了信息获取对零售商、供应链及客户产生的

收稿日期: 2024-04-06 修订日期: 2024-12-10

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJ2020019)

第一作者: 赵文丹(1976—),女,汉族,辽宁沈阳人,博士,副教授。研究方向:供应链优化、复杂过程建模。E-mail:1327856296@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

影响,结果表明制造商与零售商共享信息对零售商有利。在双渠道供应链的运作中,为满足下游客户需求,信息共享、预测需求^[8]、不同渠道间交叉补货^[9]是常见的库存控制策略。但是在这些双渠道供应链运作协调及库存补充方式中,无法避免两个渠道之间协调难度大、节点企业上下游距离远、货物运输时间较长等问题。

前置仓作为一种新型的仓储配送模式,旨在通过靠近消费者建立的小型仓库,提升配送时效并满足及时性购物需求,其功能不断完善^[10]。前置仓可以有效解决客户需求短缺及零售商库存短缺的问题,如文献[11]就有容量约束的前置仓品类优化问题进行研究,对有中心配送仓和无中心配送仓的前置仓库存容量进行对比,得到了最优库存容量和产品订货量的关系;文献[12]以供应链运作总成本为目标,利用轮廓系数法和蚁群算法确定了前置仓建造数量和配送路径;文献[13]在考虑供应链运作总成本、时间和碳排放的前提下,用非支配排序遗传算法Ⅲ(non-dominated sorting genetic algorithm Ⅲ, NSGA-Ⅲ)算法解决了前置仓的选址-路径规划问题;文献[14]以碳排放最小和低成本高效率为目标,得到了生鲜前置仓的最优布局方案;文献[15]利用NSGA-Ⅱ算法解决了以企业总成本最低和客户满意度最高为目标的前置仓选址问题。当前,有关前置仓模式的研究均保留了前置仓完整功能,使其直接面向客户。前置仓直接面向客户虽然有效保证了客户需求,但是前置仓的大量规划和建造势必会对已有的供应链网络结构造成冲击。前置仓直接面向客户,对于客户而言,前置仓只是增加了可供选择的购物地点,是一个“新零售商”,对其他零售商而言,前置仓是潜在的竞争者,会直接影响到其他零售商的库存和效益。因此,前置仓在供应链网络中的应用需要对其功能进行取舍。

前置仓临近消费者的特点恰好可以弥补双渠道供应链零售商在缺货时渠道间协调难度大、上下游货物运输时间长的问题。将前置仓应用到双渠道供应链中,如果前置仓直接面向客户,不仅增加客户的选择难度,还增加额外面向客户的运营成本,同时,前置仓和两个零售商都需要面对客户的随机需求,增加了整体的库存成本,进一步增加了供应链网络库存分配的难度。因此,考虑建设不面向客户的前置仓,使其直接向缺货的零售商补货。

现建立一个“单制造商-双分销商-双零售商-双客户”的双渠道供应链基本模型。为了解决客户随机需求导致的零售商库存短缺问题,在零售商同级设置前置仓库,用于零售商的补货,形成前置仓补

货的双渠道供应链模型。以供应链系统不确定性最低、客户满意度最大和成本得到控制为目标,通过采用比例控制来修正 Pull/Push 策略的参数,利用鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)使得目标函数达到最优化。

1 基本模型描述

随机需求下的制造业三级多产品双渠道供应链包括制造商、分销商、零售商以及客户。简化后的模型包括一个仓库、两个分销商、两个零售商和两个客户。双渠道供应链模型如图1所示。

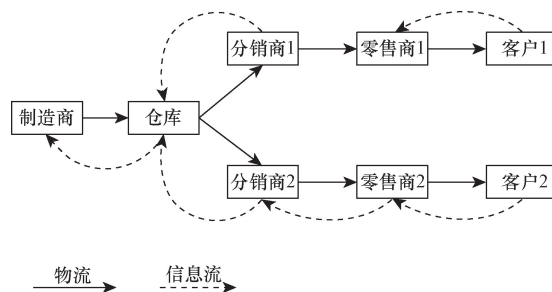


图1 双渠道供应链模型

Fig. 1 Dual channel supply chain model

基本假设如下。

- (1) 双渠道供应链的生产及运输是由下游客户订单驱动。
- (2) 制造商有 A、B、C 三类产品供客户选择。
- (3) 信息流没有延迟,零售商至客户没有物流延迟,其余物流环节均有延迟。
- (4) 物流需逐级向下传递,订货信息可根据模型需要进行信息共享。
- (5) 仓库库存不足时,向两个分销商按订单等比例发货。

在上述假设条件下,客户向零售商发起订单。如果零售商的库存能够满足客户订单,零售商将按订单量向客户发货。但若零售商库存不足以满足客户订单,它将向客户发放现有库存,并将缺货量视为未完成订单。同时,零售商会向分销商发起订单,分销商会根据订单向零售商进行补货。零售商的库存得到补充后,它将按照未完成的订单向客户发货。这个过程在供应链的每个级别节点上重复出现,直到订单到达制造商为止。制造商将根据仓库的库存情况来制定相应的生产计划。

2 模型构建

2.1 前置仓补货模式

在双渠道供应链基本模型的基础上,构建了包含前置仓的双渠道供应链模型如图2所示。

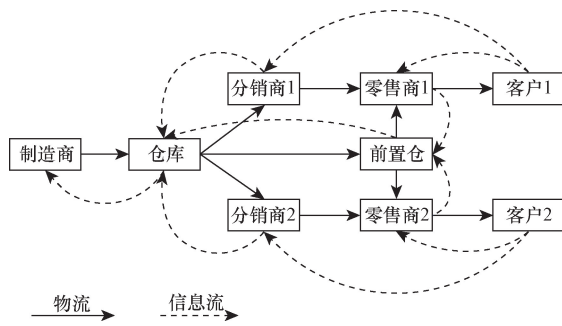


图2 前置仓补货模式

Fig. 2 Pre warehouse replenishment mode

在双渠道供应链基本模型的基础上,做如下假设。

- (1) 客户订单信息由零售商和分销商共享,以此达到分销商控制零售商库存的目的。
- (2) 前置仓和零售商同层级。
- (3) 零售商向前置仓传递库存信息,零售商库存较低时,前置仓向零售商进行少量的货物补充。
- (4) 前置仓相关的信息流无延迟,物流均有延迟。

前置仓补货的表达式为

$$y_{fn} = \begin{cases} FI_{r_1}, & I_{r_1} < GI_{r_1} \\ FI_{r_2}, & I_{r_2} < GI_{r_2} \end{cases} \quad \forall n \in \{r_1, r_2\} \quad (1)$$

式(1)中:下角标 f 为前置仓; r_1, r_2 为两个零售商; FI_{r_1} 和 FI_{r_2} 为前置仓给两个零售商的固定发货量; I_{r_1} 和 I_{r_2} 为两个零售商当前库存; GI_{r_1} 和 GI_{r_2} 为两个零售商预先设置的补货临界值。

2.2 库存控制策略

Pull 策略: 物流节点订货量为该节点当前库存量 I_i 与预先确定的最大库存量 MI_i 之差与控制律 C 的乘积。

$$D_i = C(MI_i - I_i) \quad \forall i \in \{V_w, V_d, V_r, V_f\} \quad (2)$$

式(2)中: V_w, V_d, V_r, V_f 分别为仓库、分销商、零售商、前置仓节点集合。

Push 策略: 物流节点订货量为当前库存量 I_i 与订单总和 O_{ki} 之差与控制律 C 的乘积。

$$D_i = C\left(\sum_k O_{ki} - I_i\right) \quad \forall i \in \{V_w, V_d, V_r, V_f\} \quad (3)$$

2.3 节点平衡

供应链节点中的产品在发货前进行库存积累,节点 i 的库存余量为。

$$I_i = \begin{cases} y_{ji} - \sum_k y_{ik}, & \forall i \in \{V_d, V_r, V_f\}, j \in UN_i \\ y_i^p - \sum_k y_{ik}, & \forall i \in V_w \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: y_{ji} 为从节点 j 向节点 i 发送的货物数量; y_i^p 为制造商按照生产计划向仓库的发货量; UN_i 为与节点 i 相连接的上游节点。前置仓补货模式下零售商节点的库存余量需加上前置仓的补货量 y_{fn} 。

供应链节点中的订单信息在订单处理前进行累积,节点 i 处的订单平衡公式为

$$O_{ij} = \begin{cases} u_{ji} - y_{ij}, & \forall i \in \{V_w, V_d, V_r\}, j \in DN_i \\ u_{ji} - y_{ij}, & \forall i \in V_r, j \in DC_i \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: O_{ij} 为从节点 j 发出的订单在节点 i 的处理量; u_{ji} 为从下游节点 j 发向上游节点 i 的订单量; DN_i 为与节点 i 相连接的下游节点; DC_i 为与节点 i 相连接的客户。

节点 i 的货物交付量有以下两种情况:如果节点 i 的库存满足下游节点的所有订单,则根据订单发货,有

$$y_{jk} = O_{jk} \quad (6)$$

如果节点 i 的库存不足以满足下游所有节点的订单,则根据相应订单与总订单的比例将其分配给下游各个节点,有

$$y_{jk} = \frac{O_{jk}}{\sum_i O_{ji}} I_j \quad (7)$$

2.4 评价指标

2.4.1 客户满意度

客户满意度为零售商完成客户订单的比例。客户满意度的计算公式如下。

$$CS_k = 1 - \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(\sum_j \sum_i \left| \frac{u_{ijk} - y_{ijk}}{u_{ijk}} \right| \right) dt, \quad \forall i \in V_c, j \in UN_i \quad (8)$$

$$CS = \sum_k \lambda_k CS_k - 0.0001 \text{count} \left(\left| \frac{u_{ijk} - y_{ijk}}{u_{ijk}} \right| > 0.2 \right) \quad (9)$$

式中: CS_k 为顾客对产品 k 的平均满意度; λ_k 为产品 k 的权重因子; τ 为评估时间; count 为计数器。

2.4.2 总成本

$$TC = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(\sum_i SCI_i \right) dt + \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(\sum_j \sum_i OCu_{ji} \right) dt + \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(\sum_i \sum_j TRCy_{ij} \right) dt \quad (10)$$

式(10)中: SC 为单位库存成本; OC 为单位订货成本; TRC 为单位运输成本。建立的模型的总成本主要考虑库存成本、订货成本、运输成本。

2.4.3 不确定性

信息熵^[16]反映了一个随机变量所有可能取值所带来的信息量的期望,被广泛应用于各种事件的不确定性研究^[17]。信息熵作为不确定性研究的一

个指标,有助于衡量供应链节点的不确定性。

$$E = - \sum_i p_i \log_2 p_i \quad (11)$$

式(11)中: p_i 为系统随机变量取第*i*个值的概率,如果概率为1或0,则 $E=0$ 。用信息熵衡量供应链节点的不确定性步骤如下^[18]。

步骤1 整理供应链节点数据,不确定性由节点的输入和输出衡量,输出值受到输入值影响。

步骤2 确定输出值的接受范围,在每个离散时间段内,输出值 y 处于 $(\mu_y - 2\sigma_x, \mu_y + 2\sigma_x)$ 区间内,认为输出值 y 处于期望状态。

步骤3 根据步骤2可将供应链节点订单数据分为期望和不期望两种,则订单处于期望状态的概率为

$$p_i = \frac{N_{di}}{N_{Ti}} \quad (12)$$

式(12)中: N_{di} 为供应链节点在一个数据采样周期内订单数据处于期望区间的次数; N_{Ti} 为总采样数。在此条件下,节点信息熵包括两部分,表达式为

$$\begin{aligned} E_T &= E_d + E_u \\ &= - \sum_i p_i \log_2 p_i - \sum_i (1 - p_i) \log_2 (1 - p_i) \end{aligned} \quad (13)$$

E_d 、 E_u 、 E_T 与 p_i 的关系如图3所示,这3个指标均非 p_i 的单调函数,与节点的不确定性不能一一对应。

步骤4 期望状态与非期望状态的熵比 R_{Ei} 定义如式(14)所示,该值是 p_i 的单调递减函数,可以用来衡量供应链节点的不确定性。

$$R_{Ei} = \frac{E_{di}}{E_{ui}} = \frac{p_i \log_2 p_i}{(1 - p_i) \log_2 (1 - p_i)} \quad (14)$$

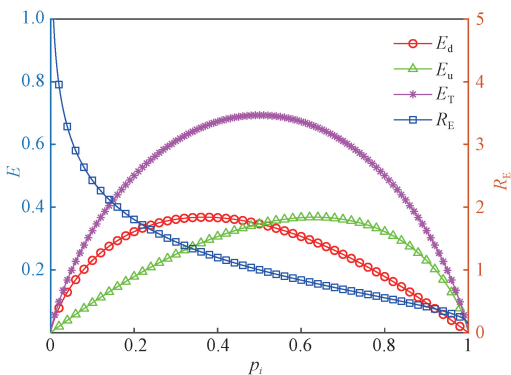


图3 熵及熵比特性

Fig. 3 Performances of entropy and entropy ratio

2.5 适应度函数

为了满足客户需求,节点企业通常采用增加库存的方式保证客户满意度,但会造成一定的额外库存成本。为了使库存成本有所控制的同时保证客户

需求,将CS、TRE和TC作为适应度函数的主体。

$$\begin{aligned} \text{Fitness} &= \alpha \text{CS} + \beta \text{normalize} \left(\frac{1}{\text{TRE}} \right) + \\ &(1 - \alpha - \beta) \text{normalize} \left(\frac{1}{\text{TC}} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)中:TRE为供应链各节点订单信息熵比之和; α 和 β 为相应指标在适应度函数中所占的比重;normalize为归一化函数。

3 库存控制与优化

3种产品订单输入信号在渠道一为 $[7, 8, 9]$ 的阶跃信号加幅值为 $[6, 6.75, 3.75]$ 、偏置为 $[8, 9, 5]$ 、频率为 $[0.02, 0.02, 0.02]$ 的正弦信号,在渠道二为 $[7, 8, 9]$ 的阶跃信号加幅值为 $[6, 6.75, 3.75]$ 、偏置为 $[10, 12, 5]$ 、频率为 $[0.015, 0.03, 0.02]$ 的正弦信号,用叠加在输入信号上的白噪声模拟供应链需求的不确定性,其中白噪声强度为0.02。在MATLABR2023b版本下,供应链仿真模型时间设置为350s,采用ODE3固定步长法求解。

3.1 库存控制策略应用

将不同的库存控制策略应用于双渠道供应链模型,信息共享下的双渠道供应链模型以及前置仓补货模式下的双渠道供应链模型中。为比较方便,3个模型依次命名为Model1, Model2, Model3。其中,由于Model2和Model3采用信息共享模式,即分销商控制零售商库存,因此Model2和Model3的两个零售商没有直接的库存控制策略。在仿真中,零售商和前置仓位于供应链最后一级,采用Pull策略,对仓库和两个分销商的策略进行排列组合,对Pull和Push策略组合如表1所示。

如表2所示,3个模型在不同的策略组合下得到了渠道一客户满意度(CS_1)、渠道二客户满意度(CS_2)、总成本(TC)以及总熵比(TRE)。

从表2可以看出,就客户满意度而言,Model1两个渠道的客户满意度均在83%以上,Model2的客户满意度表现较差,出现了8%和10%的特低客户满意度,Model3两个渠道的客户满意度均在89%以上,由此可见,Model3相较于Model2优势明显,同时

表1 策略组合

Table 1 Strategy combination

策略组合	仓库(w)	分销商一(d1)	分销商二(d2)
1	Pull	Pull	Push
2	Pull	Push	Push
3	Pull	Push	Pull
4	Push	Push	Push
5	Push	Push	Pull
6	Push	Pull	Push

表2 初始模型对比
Table 2 Initial model comparison

组合	模型	CS ₁ /%	CS ₂ /%	TC/元	TRE
1	Model1	90.17	87.83	6 143.69	10.95
	Model2	90.17	8.62	3 088.17	3.14
	Model3	90.17	92.36	4 835.19	5.95
2	Model1	83.89	87.86	4 119.03	18.74
	Model2	8.29	7.97	1 201.75	6.58
	Model3	89.94	92.37	3 478.71	3.33
3	Model1	84.44	92.95	5 238.13	15.31
	Model2	8.23	92.95	2 844.23	6.56
	Model3	90.11	92.95	4 532.41	7.83
4	Model1	83.50	86.33	3 836.38	19.36
	Model2	8.82	7.80	759.87	1.17
	Model3	90.17	92.75	2 757.75	3.33
5	Model1	83.42	92.95	4 748.42	16.21
	Model2	10.67	92.95	2 315.74	6.14
	Model3	90.17	92.95	4 218.93	7.09
6	Model1	90.17	89.45	5 648.39	13.16
	Model2	90.17	10.29	2 533.64	6.59
	Model3	90.17	91.99	4 418.52	8.57

说明在零售商完全信息共享至分销商的情况下,只有分销商控制零售商库存的供应链结构不适用 Push 和 Pull 策略的应用,采用前置仓补货模式可以有效预防库存信息共享导致的大量缺货现象;Model3 相较于 Model1 的客户满意度,表现比较均衡,最高客户满意度均达到了 92.95%,最低客户满意度差异也控制在 6% 以内。

从表 2 中的成本来看,高客户满意度均需要高额成本,对比 Model1 和 Model3,这两个模型在客户满意度差别不大的情况下,Model1 的成本在以上 6 个策略组合下均比 Model3 要高,因此 Model3 的各个企业的库存成本压力更小。

从总熵比来看,Model1 的总熵比最大,Model2 的总熵比最小。总熵比结合客户满意度来看,高客户满意度均伴随着相对较高的总熵比,对比 Model1 和 Model3,在客户满意度差异不大的情况下,Model3 的总熵比总是低于 Model1,由此可见,Model3 的稳定性相较于 Model1 更好。

综上,Model3 在保持平均最高客户满意度的情况下,维持了供应链系统的总成本最低,不确定性最低。由此可见,前置仓补货模式下双渠道供应链系统优势显著。

3.2 中断情形

随着供应链结构及运营环境的日益复杂,供应链系统正常运行受到的不可控因素越来越多,供应链中断风险加剧,该现象广泛存在于不同类型的供应链系统运营中,合适的供应链结构是提升供应链交货稳定性的有效手段^[19]。在突发状况下,供应链

某节点企业无法正常运转,能否及时满足下游客户的需求,是衡量供应链系统抗风险能力的一个重要指标。

假设 3 个模型均在开始运行时渠道一分销商物流发生中断^[20],分销商无法接收到上游仓库的货物,向下游零售商发送货物仅有分销商节点现有库存,同时,分销商信息流正常。当模型运行时间为 100 s 时,分销商节点正常运行,即分销商既能正常接收到来自上游的货物,也能向下游零售商正常发货。3 个模型在表 1 所列 6 种策略组合上的运行结果如表 3 所示。

在供应链局部节点中断的情况下,供应链系统要求尽可能保证客户满意度。如表 3 所示,Model1 在未中断的渠道二保持了 75% 以上的客户满意度,在中断渠道一上保持了 15% 以上的客户满意度;Model2 中渠道二的客户满意度出现了 0,表明 Model2 在渠道一中断时,不仅渠道一的客户无法需求,同时还影响到了渠道二的客户需求;Model3 在两个渠道上都保持了 76% 以上的客户满意度,其中在 2、3、4、5 组合上保持了 80% 以上的客户满意度,客户满意度最高达 87%。由此可见,只有 Model3 能够在突发状况下保证客户较高的满意度,Model1 则只能保证未中断渠道客户的一定量的需求,Model2 则受到中断的影响巨大,只有在组合 3 和 5 下能保证未中断渠道客户一定量的需求。

因此,在节点突发中断的情况下,Model3 相较于 Model1 和 Model2 的适应能力更强,能够源源不断向下游客户发送货物。

表3 中断情形下的仿真结果

Table 3 Simulation results under interruption conditions

组合	模型	CS ₁ /%	CS ₂ /%	TC/元	TRE
1	Model1	16.94	75.50	18 876.71	31.69
	Model2	15.11	0	19 648.53	21.25
	Model3	77.98	77.67	25 828.12	26.99
2	Model1	16.60	75.59	18 841.65	31.58
	Model2	0	0	1 048.69	6.26
	Model3	81.30	86.05	3 918.97	2.64
3	Model1	17.58	87.88	26 561.92	26.17
	Model2	0	85.77	2 313.15	8.25
	Model3	82.11	87.82	9 682.42	8.60
4	Model1	15.72	81.15	5 750.18	24.00
	Model2	0	0	577.91	1.47
	Model3	81.35	85.61	2 913.50	3.20
5	Model1	16.24	86.54	10 010.16	24.38
	Model2	0	85.77	1 742.65	7.77
	Model3	83.02	87.83	6 805.47	7.49
6	Model1	17.58	80.40	16 576.05	29.78
	Model2	14.38	0	6 293.67	18.60
	Model3	76.56	82.00	12 478.52	21.19

3.3 客户满意度分析

如表 2 和表 3 所示,客户满意度出现了 8.62% 和 0% 的特低客户满意度,以 3 个模型在组合 1 上的客户订单和发货量以及零售商库存为例进行客户满意度分析,结果如图 4~图 12 所示。

Model1 在策略组合 1 上运行后,渠道一和二 的客户订单与零售商发货量对比如图 4 和图 5 所示,两个零售商的库存变化如图 6 和图 7 所示。

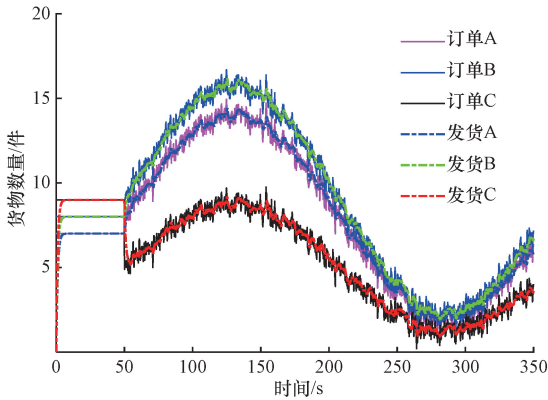


图 4 Model1 渠道一订单与发货量对比

Fig. 4 Model1 channel 1 order and shipment comparison

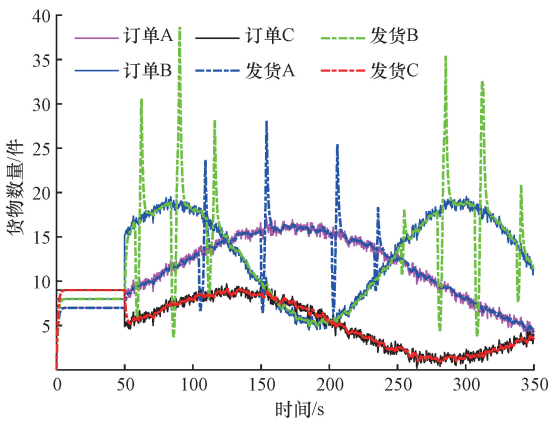


图 5 Model1 渠道二订单与发货量对比

Fig. 5 Model1 channel 2 order and shipment comparison

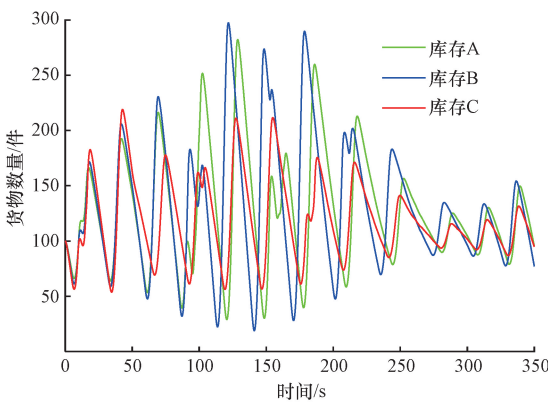


图 6 Model1 零售商 1 库存

Fig. 6 Model1 retailer 1 inventory

从图 4 和图 6 可以看出,Model1 中渠道一零售商未发生缺货现象,能够及时向客户发送货物,同时,Model2 和 Model3 渠道一零售商库存变化如图 9 和图 12 所示,这两个模型中渠道一零售商也未发生缺货现象,两个模型在渠道一的发货量跟订单量的对比图跟 Model1 一致(由于篇幅有限,只展示 Model1 的对比图),因此,3 个模型在渠道一上的客户满意度相同。

根据图 4 和图 5 可知,两个渠道下游客户的最高需求量不超过 20,由图 6 和图 7 可看出,零售商为满足客户需求维持了大量库存,其中渠道二零售商持有库存量最大接近 390,最大库存持有量远超出客户的最高需求量,同时也出现了 0 库存,导致无法及时满足客户需求。

Model2 在策略组合 1 上运行后,渠道二的客户订单与零售商发货量对比如图 8 所示,渠道二的零售商的库存变化如图 10 所示。

如图 10 所示,Model2 中渠道二由于采用分销商控制零售商的策略库存模式,虽然零售商 2 维持了低库存状态,降低了库存成本,但是导致了大量缺

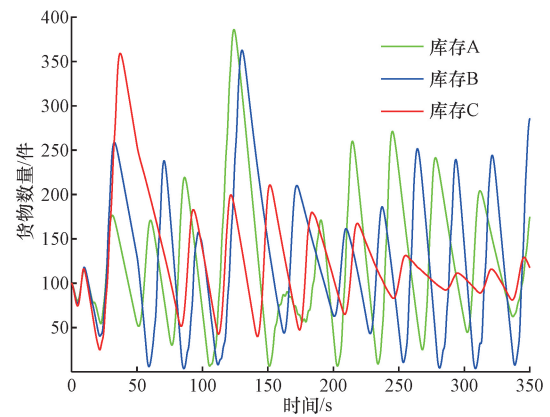


图 7 Model1 零售商 2 库存

Fig. 7 Model1 retailer 2 inventory

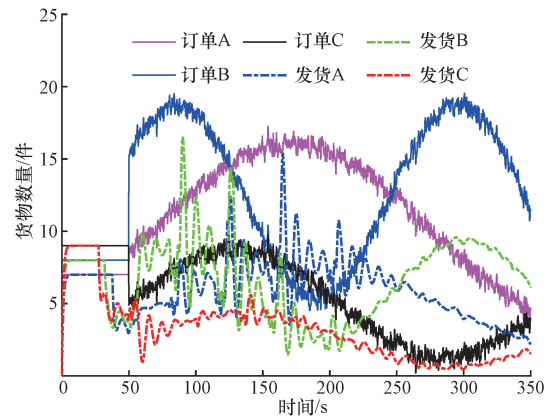


图 8 Model2 渠道二订单与发货量对比

Fig. 8 Model2 channel 2 order and shipment comparison

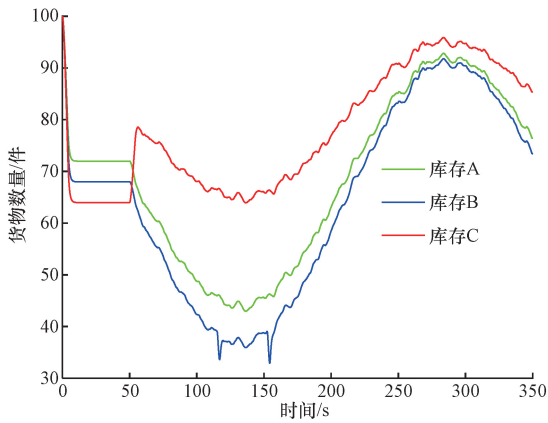


图9 Model2 零售商1 库存
Fig. 9 Model2 retailer 1 inventory

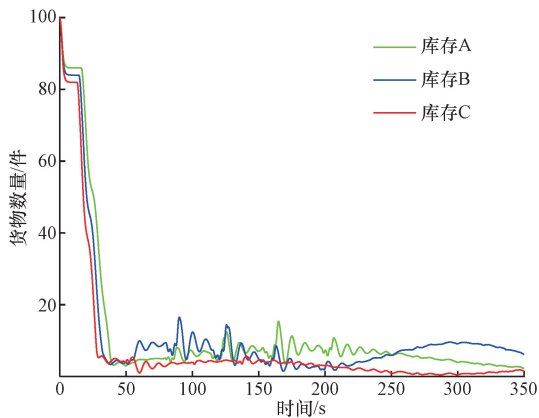


图10 Model2 零售商2 库存
Fig. 10 Model2 retailer 2 inventory

货。从图8中可看出,Model2中渠道二零售商无法及时向客户发送货物,并且长时间大量缺货,由于式(9)中客户满意度公式中添加了惩罚因子,长时间缺货使计算客户满意度过程中惩罚因子的数量累计过多,导致客户满意度很低。因此,表3中出现0%的特低客户满意度并非是零售商没有向客户发货,而是零售商长时间大量缺货导致客户满意度公式中的惩罚因子累计数量巨大,从而出现了特低的客户满意度。

对比图6和图9,Model1和Model2中渠道一的零售商库存差距明显,Model2采用了信息共享模式,由分销商控制零售商库存,相较于Model1中300的最大库存量,Model2的最大库量降低了2/3;对比图7和图10,虽然Model2中渠道二也采用了信息共享模式,实现了低库存,但是渠道二发生了大量缺货,因此,采用信息共享模式实现低库存的同时需要结合相适应的补货策略才能保证下游客户的需求。

Model3在策略组合1上运行后,渠道二的客户订单与零售商发货量对比如图11所示,前置仓向零售商关于A产品的发货量如图13所示。

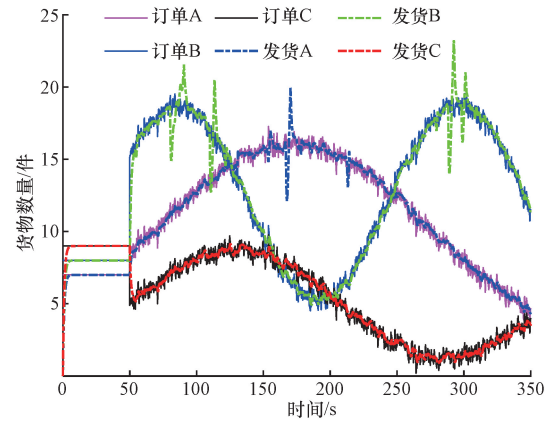


图11 Model3 渠道二订单与发货量对比
Fig. 11 Model3 channel 2 order and shipment comparison

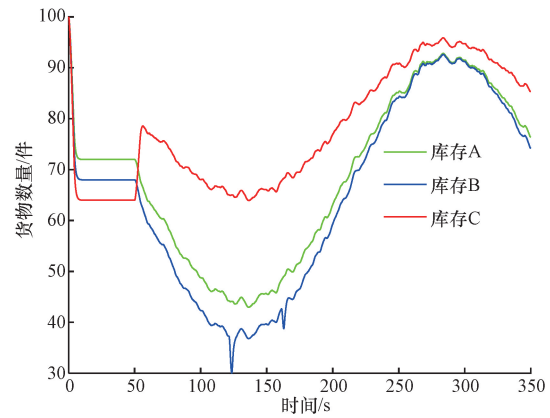


图12 Model3 零售商1 库存
Fig. 12 Model3 retailer 1 inventory

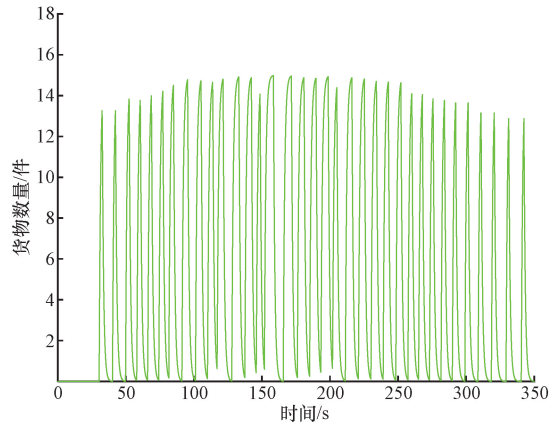


图13 Model3 前置仓A产品发货量
Fig. 13 Model3 pre warehouse A product shipment quantity

如图13所示,Model3前置仓对零售商A产品的库存进行了一定量的补充。对比图11和图8可知,Model3相较于Model2中的大量缺货,缺货现象被大幅度改善,客户满意度有了大幅度提升。

3.4 鲸鱼优化算法优化

WOA是受到座头鲸狩猎行为的启发,提出的一种简洁、高效的启发式算法。通过对包围猎物,搜

索猎物和气泡网捕食 3 个阶段建立数学模型进行最优解的求解^[21-22]。

3.4.1 包围猎物

鲸鱼在捕食过程中需要确定猎物位置,进而才能包围并捕捉猎物,但猎物在搜索空间中的位置不是先验已知的。因此,WOA 假设当前最优解为猎物位置或接近目标猎物的位置,其他搜索种群根据当前最优解更新自己的位置。数学模型如下。

$$D = |CX^*(t)| \tag{16}$$

$$X(t+1) = X^*(t) - AD \tag{17}$$

$$A = 2ar - a \tag{18}$$

$$C = 2r \tag{19}$$

式中: t 为当前迭代次数; A 和 C 分别为系数向量; $X^*(t)$ 为种群当前最优位置向量; $X(t)$ 为当前位置向量;收敛因子 a 随着种群迭代从 2 线性递减到 0; r 为属于 $[0,1]$ 的随机向量。

3.4.2 气泡网狩猎

根据座头鲸气泡网狩猎的捕食行为,此阶段 WOA 设计了收缩包围和螺旋更新位置两种策略。其中收缩包围通过减小式 (18) 中的收敛因子 a 实现, A 为 $[-a,a]$ 的随机向量。

当 $|A| \leq 1$ 时,根据式 (17) 完成对猎物的收缩包围。同时,根据鲸鱼螺旋运动状态构造的螺旋数学模型如下。

$$X(t+1) = D'e^{bl} \cos(2\pi l) + X^*(t) \tag{20}$$

式 (20) 中: D' 为猎物与当前鲸鱼个体之间的距离; b 为定义螺旋搜索形状的参数; l 为 $[-1,1]$ 的随机数。

鲸鱼会在不断缩小的圈内围绕猎物游动,同时沿着螺旋路径游动。为了模拟这种同时行为,WOA 选择相同的概率 p 实现了收缩包围和螺旋位置更新,其数学模型表示如下。

$$X(t+1) = \begin{cases} X(t) - AD, & p < 0.5 \\ D'e^{bl} \cos(2\pi l) + X^*(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \tag{21}$$

3.4.3 猎物搜索

当 $|A| > 1$ 时,WOA 在群体中随机选择一个种群代替目标猎物,鲸鱼个体为了寻找猎物离开原目标猎物,向随机个体靠近,增强了算法的全局探索能力。其数学模型表示如下。

$$D = |CX_{rand} - X(t)| \tag{22}$$

$$X(t+1) = X_{rand} - AD \tag{23}$$

式中: X_{rand} 为当前鲸鱼种群中随机一条鲸鱼的位置向量。

鲸鱼优化算法优化供应链模型的流程如图 14 所示。

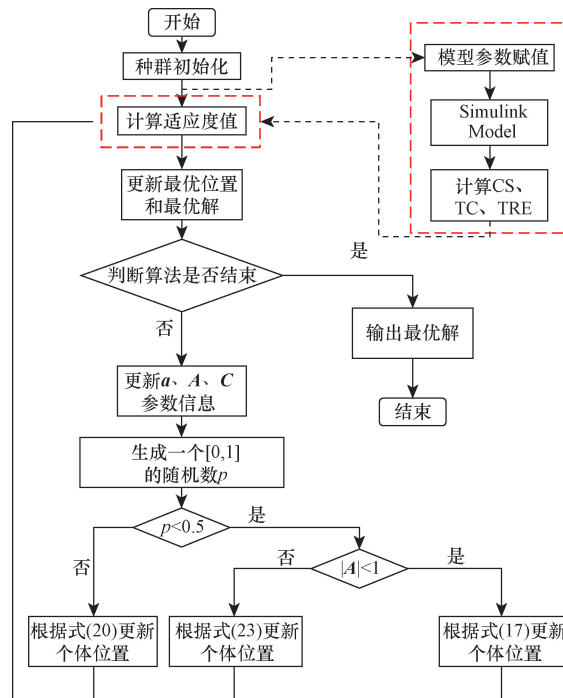


图 14 WOA 优化供应链模型

Fig. 14 WOA optimized supply chain model

鲸鱼优化算法优化供应链 Simulink 模型的步骤如下。

步骤 1 设置种群规模,最大迭代次数,初始化种群。

步骤 2 将种群赋值给模型中的库存控制参数,运行 Simulink 仿真模型,得到相应的客户满意度 CS,总成本 TC 以及总熵比 TRE。

步骤 3 根据式 (15) 及步骤 2 得到的指标计算适应度值,更新最优解。

步骤 4 判断是否达到算法截止条件,如果是,算法结束并且输出最优解,否则进入下一步。

步骤 5 更新相应的参数,根据式 (20)、式 (23)、式 (17) 更新种群。

步骤 6 返回步骤 2。

3.5 仿真优化

对 Model3 用 WOA 算法进行仿真优化,其中 WOA 种群数量为 30,迭代次数为 100, Pull/Push 策略的比例系数范围均为 $[0,15]$,优化后的结果如表 4 所示。

表 4 WOA 优化结果

Table 4 WOA optimization results

组合	CS ₁ /%	CS ₂ /%	TC/元	TRE	Fitness
1	90.17	92.70	4 407.85	3.63	0.940 0
2	90.11	92.43	3 051.50	1.42	0.938 9
3	90.17	92.95	4 065.76	3.81	0.940 9
4	90.15	92.66	2 846.65	2.89	0.939 8
5	90.17	92.95	3 677.46	3.90	0.940 9
6	90.17	92.86	3 762.94	2.91	0.940 6

从表 4 中的数据可知,Model3 在组合 3 和 5 上经过 WOA 优化得到最大适应度值,这两个方案的客户满意度相同,区别是组合 3 成本高,总熵比低,而组合 5 是成本低,总熵比高。

WOA 在组合 3 和 5 上优化 Model3 的适应度函数收敛曲线如图 15 和图 16 所示,Model3 在 6 个组合上优化前后的总熵比和总成本对比如图 17 和图 18 所示。

对比表 4 和表 2 的客户满意度可知,WOA 优化

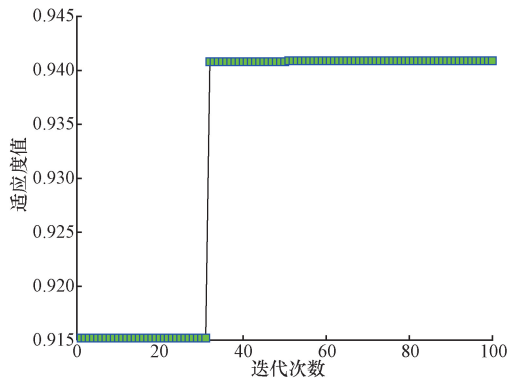


图 15 WOA 优化组合 3

Fig. 15 WOA optimization combination 3

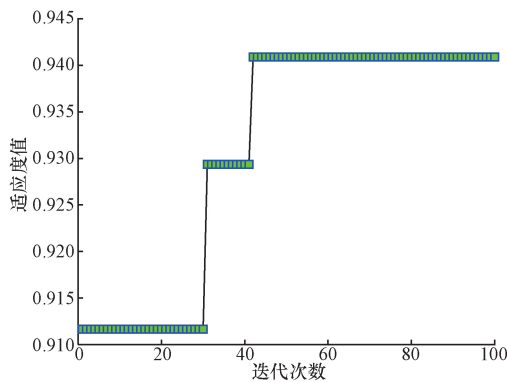


图 16 WOA 优化组合 5

Fig. 16 WOA optimization combination 5

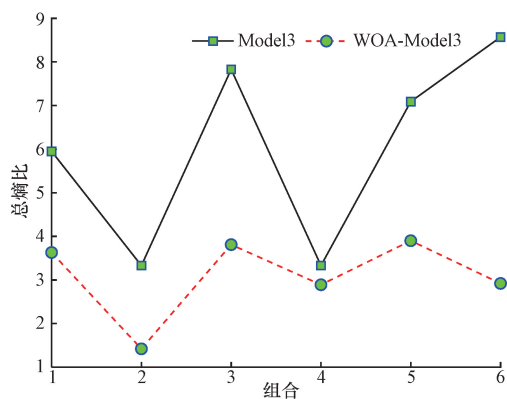


图 17 总熵比对比

Fig. 17 Comparison of total entropy ratio

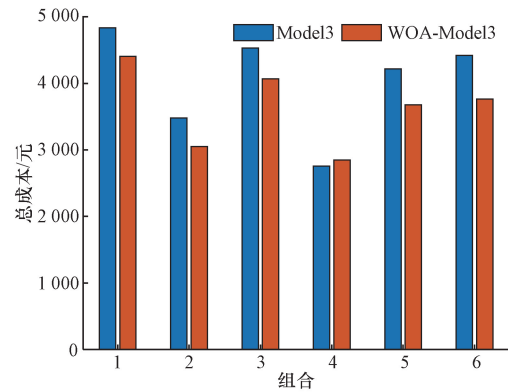


图 18 总成本对比

Fig. 18 Total cost comparison

后,客户满意度变化幅度很小。如图 17 所示,优化前后的供应链系统订单总熵比全部下降,说明经过 WOA 优化后,供应链系统订单的不确定性得到了改善。如图 18 所示,WOA 优化后,除组合 4 的总成本有略微上升,其余 5 个组合的总成本均有所下降。

综上所述,WOA 优化保证了供应链系统一定的客户满意度,控制了总成本,降低了供应链系统的不确定性。

4 结论

(1)零售商信息完全共享至分销商,由分销商控制零售商库存虽然能够使零售商实现低库存,但是不一定能够保证客户需求,信息共享模式需要结合相适应的补货策略才能在实现低库存的同时保证下游客户需求。

(2)前置仓补货模式在双渠道供应链有一方分销商节点中断时,能够及时补充该节点下游客户的需求,维持供应链向客户的正常物流配送;该模式在供应链不同节点采用不同库存控制策略时,均能够保证较高的客户满意度,说明该模式在供应链系统中有一定的竞争优势。

(3)在客户满意度能够保证较高的情况下,供应链系统无论是供不应求,还是供大于求,都应首先考虑成本,因此,前置仓补货模式下,选择 Push 策略能够节省企业成本,提高利润。

(4)前置仓补货模式保证了下游客户的满意度,增强了供应链的抗风险能力,同时,不可避免地提高了供应链的复杂度,此外,前置仓面向零售商补货增加了额外的运输成本。因此,前置仓补货模式在复杂供应链网络的货物运输和车辆调度问题是一个新的研究方向。

参 考 文 献

[1] Ziang L, Tatsushi N. Data-driven evolutionary computation for

- service constrained inventory optimization in multi-echelon supply chains[J]. *Complex Intelligent Systems*, 2023, 10(1): 825-846.
- [2] Tarek Z A, Chuan P, Yvan B. Optimization of inventory management to prevent drug shortages in the hospital supply chain[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(6): 2726.
- [3] Gerdodbari M A, Harsef F, Sadeghpour M, et al. A robust multi-objective model for managing the distribution of perishable products within a green closed-loop supply chain[J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2022, 18(5): 3155-3186.
- [4] Xi Z, Teng N. Impacts of horizontal mergers on dual-channel supply chain[J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2022, 18(1): 655-680.
- [5] Xu M X, Yu R S, Su H S. Pricing and service strategies of dual-channel supply chain under information sharing[J]. *Organization and Management of Enterprises*, 2023, 98(2): 154-162.
- [6] Li Y Q, Wu D S, Dolgui A. Optimal trade credit coordination policy in dual-channel supply chain with consumer transfer[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(15): 4641-4653.
- [7] Chen J, Pun H, Zhang Q. Demand information acquisition strategy in a dual channel supply chain[J]. *Naval Research Logistics*, 2023, 70(4): 340-357.
- [8] Babai M Z, Boylan J E, Rostami-Tabar B. Demand forecasting in supply chains: a review of aggregation and hierarchical approaches[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(1): 324-348.
- [9] 赵川, 苗丽叶, 杨浩雄, 等. 随机需求下双渠道供应链库存动态交互优化[J]. *计算机应用*, 2020, 40(9): 2754-2761.
Zhao Chuan, Miao Liye, Yang Haoxiong, et al. Interactive dynamic optimization of dual-channel supply chain inventory under stochastic demand[J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(9): 2754-2761.
- [10] 梁力军, 王晨, 袁苗苗. 生鲜电商前置仓选址因素分析与模型构建研究[J]. *物流科技*, 2024, 47(3): 50-54.
Liang Lijun, Wang Chen, Yuan Miaomiao. Analysis of factors and model construction for pre warehouse site selection in fresh e-commerce[J]. *Logistics Technology*, 2024, 47(3): 50-54.
- [11] 蒙铭友, 邓世名, 徐和. 前置仓库存容量与品类优化策略研究[J]. *管理工程学报*, 2024, 38(4): 170-181.
Meng Mingyou, Deng Shiming, Xu He. Research on the capacity and category optimization strategy of pre warehouse storage[J]. *Journal of Management Engineering*, 2024, 38(4): 170-181.
- [12] 李丽滢, 刘小婉, 牛莉霞. 考虑仓库建造数量的前置仓选址——路径优化研究[J]. *制造业自动化*, 2023, 45(6): 203-209.
Li Liying, Liu Xiaowan, Niu Lixia. Research on path optimization for pre warehouse site selection considering the quantity of warehouse construction[J]. *Manufacturing Automation*, 2023, 45(6): 203-209.
- [13] 杨雨蕾, 张锦, 孙文杰, 等. 动态需求下的基于医药前置仓的选址-路径问题[J]. *控制与决策*, 2023, 38(6): 1670-1678.
Yang Yulei, Zhang Jin, Sun Wenjie, et al. Location path problem based on pharmaceutical pre warehouse under dynamic demand[J]. *Statistics and Decision Making*, 2023, 38(6): 1670-1678.
- [14] 游思晴, 赵涵, 周宏丽. 低碳目标下改进聚类算法的生鲜前置仓选址研究[J]. *铁道运输与经济*, 2023, 45(3): 70-76.
You Siqing, Zhao Han, Zhou Hongli. Research on pre-warehouse location of fresh food based on improved clustering algorithm under low carbon target[J]. *Railway Transport and Economy*, 2023, 45(3): 70-76.
- [15] 赵琨, 赵刚, 赵永健, 等. 基于非等覆盖半径的前置仓选址[J]. *上海海事大学学报*, 2022, 43(2): 66-73.
Zhao Kun, Zhao Gang, Zhao Yongjian, et al. Location selection of front warehouses based on unequal coverage radius[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2022, 43(2): 66-73.
- [16] Gilad G, Marco T. Entropy and relative entropy from information-theoretic principles[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2021, 67(10): 6313-6327.
- [17] 何群, 余志红, 陈志刚, 等. 基于改进信息熵和 LSTM 网络的轴承故障诊断[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(12): 4969-4975.
He Qun, Yu Zhihong, Chen Zhigang, et al. Bearing fault diagnosis based on improved information entropy and LSTM network[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(12): 4969-4975.
- [18] Zhao W, Wang D. Simulation-based optimization on control strategies of three-echelon inventory in hybrid supply chain with order uncertainty[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 54215-54223.
- [19] 余洋, 罗祎青, 魏荣辉, 等. 考虑节点中断风险的弹性供应链设计方法[J]. *化工学报*, 2024, 75(1): 338-353.
Yu Yang, Luo Yiqing, Wei Ronghui, et al. A resilient supply chain design method considering node disruption risk[J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(1): 338-353.
- [20] 王军进, 张白羽, 刘家国. 供应中断风险下具有质量差异的产品组合定价与采购策略[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(3): 1068-1084.
Wang Junjin, Zhang Baiyu, Liu Jianguo. Pricing and sourcing strategies for a combination of products with quality differentiation under the supply disruption risk[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2024, 44(3): 1068-1084.
- [21] Chinnaraj G, Arokiasamy A. Enhanced inventory management using blockchain technology under cloud sector enabled by hybrid multi-verse with whale optimization algorithm[J]. *International Journal of Information Technology Decision Making*, 2022, 21(2): 577-614.
- [22] 郝可青, 吕志刚, 邸若海, 等. 基于鲸鱼算法优化长短时记忆神经网络的锂电池剩余寿命预测[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(29): 12900-12908.
Hao Keqing, Lü Zhigang, Di Ruohai, et al. Remaining useful life prediction of lithium battery based on long short-term memory optimized by whale optimization algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(29): 12900-12908.