

考虑双类拆分与发货时间的多品订单多仓履行问题研究*

范志强¹, 张颖¹, 张念², 段冰冰¹

(1. 河南理工大学 工商管理学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南工业大学 管理学院, 郑州 450001)

摘要:针对线上平台订单履行中的拆分策略带来的一系列高成本、高扰动和高污染问题,基于“先拆后合”原则,首先对订单进行拆分,以充分利用多仓资源,然后在分拨中心进行合并配送,构建了以最小化成本为目标的订单拆分与合并配送联合优化模型。该模型同时考虑了数量拆分与品类拆分2类情形,设置了更加符合现实情况的订单发货时间约束,对订单拆分与合并配送进行了联合优化。运用模糊集理论,对所建立的模糊规划模型进行了清晰等价转化。通过算例分析,验证了模型的可行性与有效性。实验结果表明:与已有文献提出的模型相比,新构建的模型在控制订单履行成本、减轻顾客扰动和环境污染等方面更具优势;同时敏感性分析表明订单履行成本与品类数量呈正相关,与库存量呈负相关。

关键词:品类拆分;数量拆分;发货时间约束;联合优化;混合整数规划模型

中图分类号:O221.4

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)06-0001-09

近些年来,随着互联网技术的普及与发展,线上购物已成为满足消费者日常需求的主流方式之一。线上平台订单数量呈现出爆炸性增长,且订单具有一单多品、多仓协同配送、发货时间要求严格(如当天发货、半日达、次日达)以及库存结构复杂等特点。为满足订单要求,线上平台在订单履行过程中普遍采用订单拆分策略,以优化配送效率并提升客户满意度。然而,高拆单率引发的多次零散配送现象,给线上订单履行带来严峻挑战,既增加了订单履行成本,又增加了碳排放和快递包装物的消耗。显然,订单履行问题已成为线上平台面临的难题,现阶段对该问题的研究主要从订单分配和订单配送这2个方面展开。

在订单分配方面,相关研究起源于对线下订单的讨论。张翠华等人^[1]针对多供应商采购订单分配问题,构建了以最小化采购成本为目标的数学模型,为订单分配提供了有效的决策支持;刘路等人^[2]考虑在双目标优化模型中引入供应商排名进行订货,在实现采购绩效最大化的同时,最大限度地降低采购成本;Guo等人^[3]应用Stackelberg博弈模型解决生产制造商的服务订单分配问题,并得出了最优订单分配结果;王珂等人^[4]针对不确定环境下具有不同供应合约的供应商选择与订单分配问题,构建了基于风险-均值分析的模糊两阶段多周期集成优化模型。随着数字经济的发展,线上订单分配逐渐成为热门,对这类问题的研究重点在于将多品类订单拆分后,再合理分配到多个仓库,尽可能减少订单拆分数量。Archetti等人^[5]的研究聚焦于按产品品类对订单进行拆分,强调同一客户的相同产品不应由同一车辆配送,这一策略有助于提升物流配送的效率和灵活性;Xu等人^[6]则侧重于减少多品类订单的拆分数量,他们提出通过优化装箱方案,用尽可能少的箱子运输多品类订单,从而降低运输成本;Catalán等人^[7]探讨了通过配送中心调节库存的策略,以减少订单拆分数量,进而优化物流配送流程;刘明等人^[8]研究了仓配模式下大型电商订单的拆单率问题,对单品订单进行拆分配送,建立了以最小化拆单率为目标的数学模型;Zhang等人^[9]的研究侧重于利用历史订单数据对订单进行分类处理,进而与仓库进行匹配,旨在减少订单拆分,他们通过数据分析的方法,为不同类型的订单找到合适的仓库,以优化订单分配过程;李建斌等人^[10]考虑到订单不断更新,对多频次下单客户的订单再分配处理,达到降低订单拆单率的目的;钟丽文等人^[11]针对在线零售商一地多仓布局,仅考虑品类拆单的场景,建立最大化整单配送模型,以进一步降低拆单率;黄敏芳等人^[12]研究考虑了“一单多品”订单如何进行合理分配问题,为了优化多仓之间的产品品类拆分,以成本最小化为目标构建数学模型;Zhu等人^[13]研究了多品订单履行问题,优化了多个仓库间订单产品品类拆分,达到

* 收稿日期:2024-04-11 修回日期:2025-01-21 网络出版时间:2026-01-22T11:58

资助项目:国家社会科学基金年度项目(No. 25BLG211)

第一作者简介:范志强,男,副教授,博士,研究方向为物流系统优化与决策,E-mail:fanzhiqiang@hpu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20260122.1051.002

最小化订单拆分次数,减少多品订单的运输成本。

在订单配送方面,谢天保等人^[14]提出基于物流信息共享,建立最小化车辆固定费用和运输成本的多中心物流协同调度模型;张源凯等人^[15]对网上超市订单分配与配送联合优化问题进行了研究,但缺乏对订单配送时间和配送次数的考虑;肖玉徽等人^[16]研究了巡回配送模式下,考虑各配送中心车辆使用成本、运输成本、卸货成本和时间窗惩罚成本,构建了带有配送时间窗约束的多配送中心协同配送模型;张艳菊等人^[17]提出多门店协同下,通过引入拆单数量限制,采用协同配送的模式整合路径,降低订单履行成本;Harbaoui 等人^[18]以最小化配送距离为目标建立模型,研究具有优先级、库存容量和配送时间限制的多仓库配送的最佳路线;Kumar 等人^[19]探究了假设物品变质速度恒定,且库存与需求无关,在有积压的仓库模型中允许出现短缺,研究了特定时间段库存量有限的多仓协同配送问题;Wang 等人^[20]研究了基于配送时间窗约束的多配送中心协同取货问题,将该问题转化为两阶段问题进行优化求解,提高了物流网的配送效率,以最小化车辆数量和运输成本为目标建立数学模型;朱姗等人^[21]提出了“一地多仓”型网上超市多品订单的拆分优化方法,提高了配送效率,降低了物流成本。

上述研究成果为本文提供了重要的理论参考,但在以下 3 个方面仍有待完善:一是当前研究仅考虑了数量或品类的单一维度,缺乏对两者进行同时考量的深入研究;二是忽视了平台对订单发货时间的要求,与现实情况有一定差距,如京东要求在接到订单后必须于 24 h(1 个波次)内发货;三是当前研究要么分析订单分配问题,要么分析订单配送问题,缺乏对 2 个问题联合优化的研究。基于此,本文以一地多仓为背景,以多品订单履行问题为对象,考虑品类拆分、数量拆分和平台对订单发货时间的要求,构建了订单拆分与合并配送联合优化模型,旨在降低订单履行成本,减少对客户和环境的影响。

1 考虑双类拆分与发货时间的订单履行问题建模

1.1 问题描述

线上平台基于销售数据在特定区域设立多个仓库,用以配送涵盖多品类产品的客户订单。客户通过在线平台下单后,订单中心将综合考虑客户的地理位置、平台设定的发货时间限制、订单内产品的品类和数量,以最优化的方式将订单分配到相应的仓库进行配送。鉴于各仓库库存量的差异,当某一仓库无法完全满足订单需求时,订单中心会将原订单拆分为若干子订单,并分配给其他仓库,直至原订单中的所有产品需求得到完全满足。各仓库完成子订单的打包出库后,会按照规划的路径转运至分拨中心,进行合并配送。在此过程中,订单中心还需根据仓库、分拨中心与客户之间的实际距离,决策子订单的最佳转运路径,以确保合并配送的高效性和准时性。如图 1 所示,对订单 1 进行数量和品类拆分,拆分为 3 个子订单(包括子包裹 1-1、1-2、1-3),对订单 2 进行品类拆分,拆分为 2 个子订单(包括子包裹 2-1、2-2),经过各自仓库进行拣选打包后转运到分配的分拨中心进行合并,然后集中送到客户手上。

1.2 前提假设

为明确研究范围,在建立模型之前,给出以下假设:

- 1) 单个仓库某种产品可以缺货,但不会出现全部仓库缺货;
- 2) 允许订单进行数量和品类拆分;
- 3) 仓库、订单、分拨中心位置,订单需求量、库存量已知;
- 4) 假设所有仓库储存规格相似,仓库内部设施相同。

1.3 符号说明

1) 模型的参数符号及含义见表 1。其中:考虑到参数 \tilde{e}_{ki} 受到未来订单数量、拣选繁忙程度、物流设备运行情况、员工熟练程度等多种不确定性因素影响,且较难用概率分布进行刻画的特点,引入三角模糊数表示。

2) 本文决策变量及相关含义见表 2。

1.4 模糊模型构建

1.4.1 目标函数

订单履行成本主要包括:拣货成本、打包成本和配送成本。由于前面假设仓库内部设施大都相同或者相似,所以在不考虑拣货员熟练程度情况下,无论订单被分配给哪个仓库,拣货成本都是相同的。故本文的订单履行成本只考虑打包成本 c^{pack} 和配送成本 c^{ship} 。其中,打包成本与拆单数量有关,可表示为:

$$c^{pack} = \sum_k \sum_j \sum_i c_1 \times y_{kji}。$$

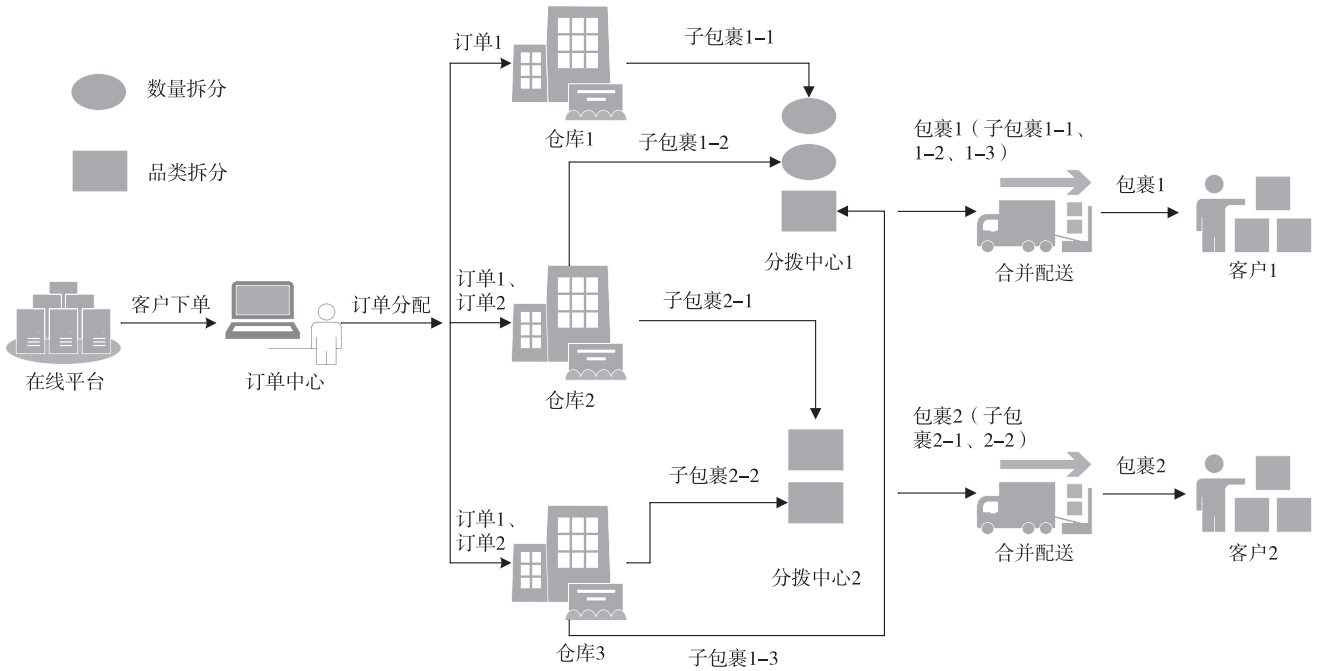


图 1 订单履行示意图

Fig. 1 Order fulfillment diagram

表 1 参数及相关含义

Tab. 1 Parameters and their related meanings

参数	含义	参数	含义
K	仓库集合, $K = \{1, 2, 3, \dots, k\}$	D_{ji}	订单 j 对产品 i 的需求数量
H	分拨中心集合, $H = \{1, 2, 3, \dots, h\}$	d_{kh}	仓库 k 到分拨中心 h 的距离
J	订单集合, $J = \{1, 2, 3, \dots, j\}$	d_{hj}	分拨中心 h 到订单 j 客户的距离
I	产品集合, $I = \{1, 2, 3, \dots, i\}$	E_j	订单 j 中所有产品出库完成时长
c_1	单位产品打包成本	ΔF	平台限制订单最长发货时间
c_2	单位产品从仓库到分拨中心的单位距离运输成本	M	一个非常大的正数
c_3	单位产品从分拨中心到订单客户的单位距离配送成本	\tilde{e}_{ki}	仓库 k 中产品 i 的出库时长(即发货时间)
S_{ki}	仓库 k 累计的产品 i 的储存数量		

表 2 决策变量及相关含义

Tab. 2 Decision variables and related meanings

决策变量	含义
Q_{khi}	从仓库 k 到分拨中心 h 运输产品 i 的数量
Q_{hji}	从分拨中心 h 到订单客户 j 配送产品 i 的数量
Q_{khji}	仓库 k 经分拨中心 h 为订单客户 j 配送产品 i 的数量
y_{kji}	0-1 变量, 订单 j 中产品 i 由仓库 k 配送时为 1, 否则为 0
y_{hj}	0-1 变量, 订单 j 中的所有产品由分拨中心 h 来配送时为 1, 否则为 0

考虑将订单分配到仓库进行单独打包,再经分拨中心将同一订单的所有包裹合并配送到客户手中。配送过程中会产生从仓库到分拨中心的配送成本和分拨中心到客户的配送成本这 2 部分。因此,配送成本可表示为:

$$c^{\text{ship}} = \sum_k \sum_h \sum_i c_2 \times d_{kh} \times Q_{khi} + \sum_h \sum_j \sum_i c_3 \times d_{hj} \times Q_{hji},$$

该问题的整数规划模型目标函数如下:

$$\min z = \sum_k \sum_j \sum_i c_1 \times y_{kji} + \sum_k \sum_h \sum_i c_2 \times d_{kh} \times Q_{khi} + \sum_h \sum_j \sum_i c_3 \times d_{hj} \times Q_{hji}. \quad (1)$$

1.4.2 约束条件

$$Q_{hji} \geq y_{hj} D_{ji}, \forall h, j, i, \quad (2)$$

$$\sum_h Q_{khi} \leq S_{ki}, \forall k, i, \quad (3)$$

$$\sum_k Q_{khi} = \sum_j Q_{hji}, \forall h, i, \quad (4)$$

$$Q_{khi} = \sum_j Q_{khji}, \forall k, h, i, \quad (5)$$

$$Q_{hji} = \sum_k Q_{khji}, \forall h, j, i, \quad (6)$$

$$M * y_{kji} \geq \sum_h Q_{khji}, \forall k, j, i, \quad (7)$$

$$\tilde{e}_{ki} y_{kji} \leq E_j, \forall k, j, i, \quad (8)$$

$$\Delta F \geq E_j, \forall j, \quad (9)$$

$$\sum_h y_{hj} = 1, \forall j, \quad (10)$$

$$Q_{khi}, Q_{hji}, Q_{khji} \geq 0, \forall k, h, j, i, \quad (11)$$

$$y_{hj}, y_{kji} \in \{0, 1\}, \forall k, j, i. \quad (12)$$

目标函数(1)表示最小化订单履行成本,包括打包成本和配送成本。约束条件(2)表示需求约束,即订单 j 对于产品 i 的需求必须被满足;约束(3)表示仓库供应能力约束,即仓库 k 供应产品 i 的数量不能超过储存量;约束(4)表示分拨中心前后流量平衡约束,即分拨中心 h 的进入流量需要等于发出的流量;约束(5)表示从仓库 k 到分拨中心 h 运输的产品 i 数量与仓库 k 经分拨中心 h 为订单 j 运输的产品 i 数量相等;约束(6)表示从分拨中心 h 为订单 j 配送的产品 i 数量与仓库 k 经分拨中心 h 为订单 j 运输的产品 i 数量相等;约束(7)表示决策变量 y_{kji} 的大小;约束(8)和(9)表示产品打包出库时间限制;约束(10)表示 1 个订单只能由 1 个分拨中心配送;约束(11)表示决策变量的非负性;约束(12)表示决策变量为 0-1 变量。

1.5 模糊约束条件的清晰等价处理

根据现实情况,产品挑选打包出库的时间是模糊的,同一件产品的出库时间有轻微的变动。模糊性可以通过模糊集刻画,论域 X 中的模糊集 \tilde{A} 的隶属函数用 $u_{\tilde{A}}(x)$ 表示。该函数将 X 中的元素 x 赋予区间 $[0, 1]$ 中的一个实数,函数值 $u_{\tilde{A}}(x)$ 表示 \tilde{A} 中 x 的隶属度。

在所有的模糊集中,三角模糊数由于具有良好的灵活性,可以更好地满足实际需求等优势得到了广泛使用,隶属函数

$$u_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x = b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

可简记为 $\tilde{A} = (a, b, c)$ 。在实际使用中, a, b, c 分别代表变量或参数模糊范围的最小值、最可能值、最大值。对于订单 j , 产品出库时间过晚会导致订单配送超时, 太早则会增加分拨中心的储存成本, 因此, 产品出库的平均时间应尽可能与线上平台限制的最佳出库时间相匹配。产品 i 在仓库 k 出库的平均时间 \tilde{e}_{ki} 可表示为一个模糊范

围 $\tilde{e}_{ki} = (e_{ki}^1, e_{ki}^2, e_{ki}^3)$, 其中: e_{ki}^1 为产品出库时间的下限值, e_{ki}^2 为产品最佳出库时间, e_{ki}^3 为产品出库时间的上限值。产品实际出库时间与线上平台限制的最佳出库时间越接近越好且不能超过线上平台限制的最大出库时间。

在此基础上,对于给定的置信水平 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ 可将上述含有三角模糊数的约束条件即式(8)通过模糊规划的方法转化为如下形式:

$$[(1-\alpha)e_{ki}^1 + \alpha e_{ki}^2]y_{kji} \leq E_j, \forall k, j, i.$$

2 算例分析

2.1 参数设计

基于线上平台订单具有“一单多品”“多仓协同配送”的特点以及大城市对城区道路运输工具的限制,加上各仓库、分拨中心和客户在特定区域布局明显的特点,同时结合当前线上平台的实际运营管理特点设计算例。共设置 5 组算例,订单量 j 依次增大,分别为 30、50、80、100、150,单个订单所含产品品类 i 服从均匀分布 $U(2, 6)$, 单个订单中每种产品的需求量服从均匀分布 $U(1, 7)$, 单个产品打包出库平均时长服从均匀分布 $U(0.1, 0.3)$ 。其他参数为 $c_1 = 0.5$ 元, $c_2 = 0.03$ 元, $c_3 = 0.05$ 元, $E_j = 0.4$ h, $\Delta F = 0.5$ h, $M = 100\ 000$ 。仓库数量 $k = 4$, 分拨中心数量 $h = 3$, 仓库、分拨中心和客户的坐标随机分布在范围为 $[100, 100]$ 的区域内,如图 2 所示。

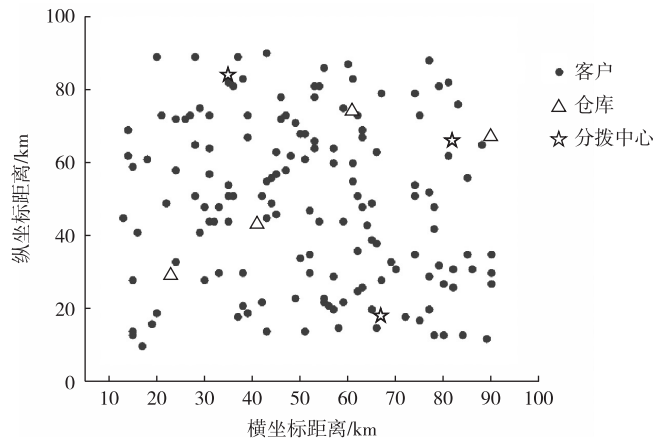


图 2 仓库、分拨中心及客户的位置分布图

Fig. 2 Location distribution map of warehouses, distribution centers and customers

2.2 算例求解和模型对比分析

2.2.1 算例求解

将本文模型与文献[21]模型进行对比,运行结果见表 3。显然,2 种模型的单位订单履行成本在 9~18 元之间,这与实际情况相符,说明参数取值合适。

表 3 文献[21]模型与本文模型结果对比

Tab. 3 Comparison between literature [21] and the results of the model

订单数/个	文献[21]模型			本文模型			单位订单履行成本节约百分比	减少配送次数/次
	总订单履行成本/元	单位订单履行成本/元	配送次数/次	总订单履行成本/元	单位订单履行成本/元	配送次数/次		
30	537.90	17.93	33	309.81	10.33	30	42.39%	3
50	813.90	16.28	52	507.29	10.15	50	37.65%	2
80	1 239.42	15.49	85	790.90	9.89	80	36.15%	5
100	1 547.28	15.47	108	903.58	9.04	100	41.56%	8
150	2 317.14	15.44	162	1 354.23	9.03	150	41.52%	12

2.2.2 模型对比分析

由图 3 给出的结果可以看出,随着订单规模的不断增大,2 种模型的总订单履行成本均呈现上升趋势,这是因为订单量增加,配送成本和打包成本也会相应增加,进而导致总订单履行成本增加。

由图 4 给出的结果可以看出,随着订单规模的不断增加,相较于文献[21]的模型,本文模型的单位订单履行成本分别节约了 42.39%、37.65%、36.15%、41.56%、41.52%,平均值为 39.85%。显然,本文模型在订单履行成本控制方面具有明显优势,这种成本节约有利于提升线上平台的盈利能力。

由表 3 可知,与文献[21]的模型相比,本文模型配送次数分别降低了 3、2、5、8、12 次,这得益于本文对拆分后子订单的合并配送。配送次数的降低,不但可以减少末端物流带来的顾客扰动问题(沟通与签收),还在一定程度上缓解了由物流包装及配送车辆使用带来的包装废弃物污染和车辆能源消耗污染问题。

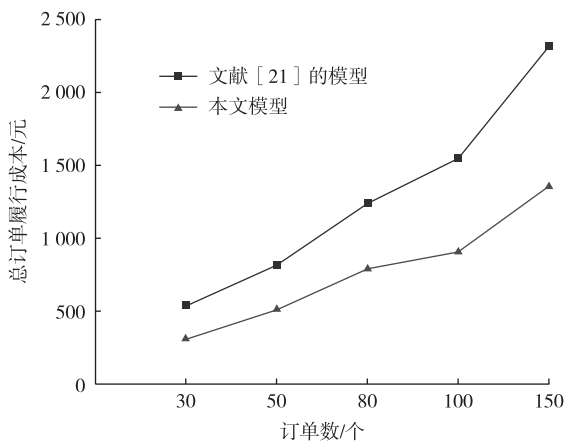


图 3 不同规模下 2 种模型
总订单履行成本对比

Fig. 3 Comparison of total order fulfillment costs between two models at different scales

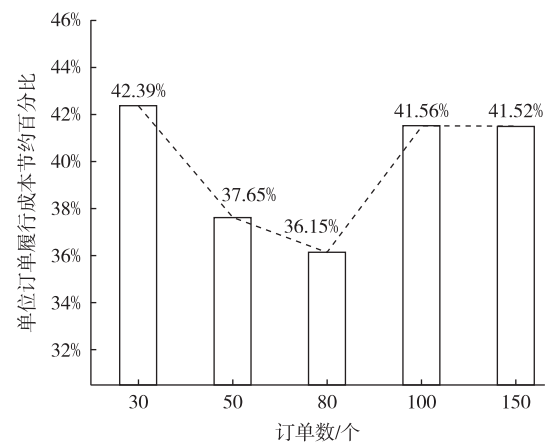


图 4 不同规模下本文模型较已有文献模型
单位订单履行成本节约百分比

Fig. 4 Compared with the existing literature models, this model saves percentage of unit order fulfillment cost at different scales

2.3 敏感性分析

由于订单中产品品类和库存量对总订单履行成本和单位订单履行成本均有影响,分别令订单品类数量从 1 种增加到 6 种,库存量从订单需求量的 1 倍增加到 1.8 倍,进行敏感性分析。

2.3.1 品类数量

根据表 4 和图 5 给出的结果,随着品类数量的增加,总订单履行成本和单位订单履行成本均呈现上升趋势。订单品类数量从 1 递增至 6 时,总订单履行成本从 136.11 元增加到 790.9 元,上升了 481.2%。与此同时,单位订单履行成本从 1.7 元增加到 9.89 元,上升了 481.8%。

对实验结果作进一步分析表明:随着订单品类数量的增加,单个仓库很难满足 1 个订单中所有产品的需求,增加了订单拆分次数,以及随之而产生了新的打包成本。

2.3.2 库存量

由表 5 和图 6 可以看出,随着库存量的增加,总订单履行成本和单位订单履行成本均呈现下降趋势。当库存量从订单需求量的 1 倍增加到 1.8 倍时,总订单履行成本从 790.9 元下降至 715.72 元,单位订单履行成本从 9.89 元下降至 8.5 元。可见,订单履行成本随着库存量的增加而呈下降趋势。

表 4 品类数量从 1 增加到 6 时各成本变化情况

Tab. 5 Cost changes when the number of categories increases from 1 to 6

品类数量/种	总订单履行成本/元	单位订单履行成本/元	品类数量/种	总订单履行成本/元	单位订单履行成本/元
1	136.11	1.70	4	536.21	6.70
2	272.85	3.41	5	662.45	8.28
3	419.28	5.24	6	790.90	9.89

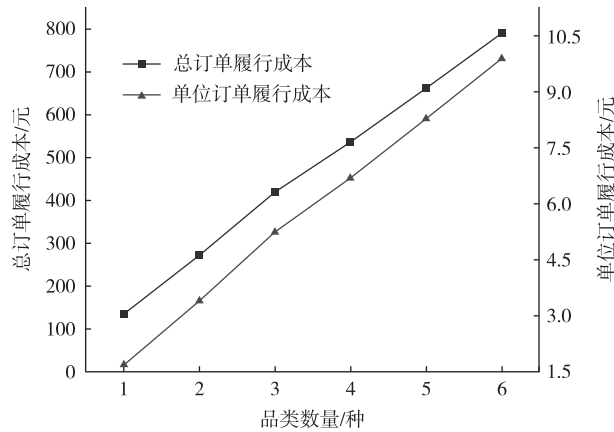


图 5 品类数量从 1 增加到 6 时各成本变化趋势

Fig. 5 Cost trends when the number of categories increases from 1 to 6

表 5 库存量从需求量的 1 倍增加到 1.8 倍时各成本变化情况

Tab. 5 Changes in costs when inventory levels increase from 1 time demand to 1.8 times demand

库存量变化/倍	总订单履行成本/元	单位订单履行成本/元
1	790.90	9.89
1.2	722.83	9.04
1.4	719.57	8.99
1.6	717.44	8.97
1.8	715.72	8.95

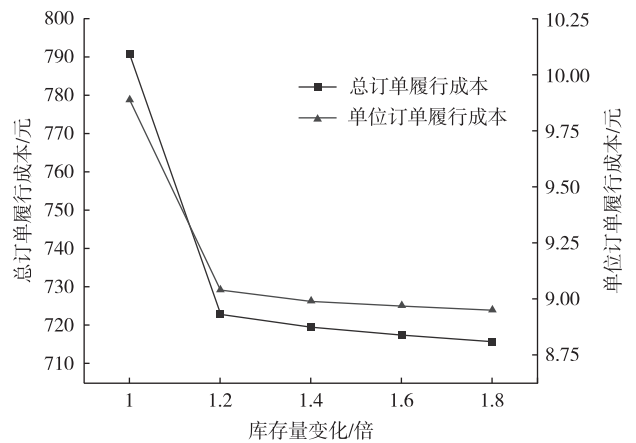


图 6 库存量从需求量的 1 倍增加到 1.8 倍时各成本变化趋势

Fig. 6 Cost trends when inventory levels increase from 1 time demand to 1.8 times demand

对实验结果作进一步分析表明:随着库存量的增加,减少了订单拆分次数,以及随之产生的打包成本。但订单拆分次数不会无限下降,在实验中,当库存量达到订单需求量的 1.8 倍时,订单拆分降至最低(不再拆分)。因此,企业需要权衡库存量与订单需求的关系,保持合理的产品库存规模。

3 结论

本文结合线上平台订单的一单多品、多仓协同配送、平台发货及收货时间严格、拆单现象严重、库存结构复杂等特点,构建了以最小化成本为目标的订单拆分与合并配送联合优化模型。与已有研究相比,本文创新之处在于:一是同时考虑了数量拆分与品类拆分;二是结合实际情况,设置了订单发货时间约束;三是对订单拆分与合并配送进行了联合优化。研究成果表明,与已有文献相比,本文模型可进一步降低订单履行成本、减轻顾客扰动及环境污染。本文研究的是线上平台多品订单多仓履行问题,未来可与车辆路径优化问题进行整合,进一步降低订单配送成本。

参考文献:

[1] 张翠华,朱宏,马林. 基于 JIT 采购的订单分配问题模型及仿真应用[J]. 东北大学学报(自然科学版),2006,27(11):1291-1294.
ZHANG C H,ZHU H,MA L. The model of order allocation for JIT purchasing and its simulative application[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2006,27(11):1291-1294.

[2] 刘路,李文欣,宋晓,等. 基于模糊群决策的绿色供应商选择和订单分配方法[J]. 系统仿真学报,2023,35(10):2133-2149.
LIU L,LI W X,SONG X,et al. A fuzzy group decision-making-based method for green supplier selection and order allocation

- [J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(10): 2133-2149.
- [3] GUO W, JIANG P Y. Manufacturing service order allocation in the context of social manufacturing based on Stackelberg game [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019, 233(8): 1890-1901.
- [4] 王珂, 张玲珍, 周建. 基于风险-均值分析的供应商选择与订单分配集成优化模型与求解[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(10): 33-39.
WANG K, ZHANG L Z, ZHOU J. Integrated optimization model and solution for supplier selection and order allocation based on risk-mean analysis[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(10): 33-39.
- [5] ARCHETTI C, BIANCHESSI N, SPERANZA M G. A branch-price-and-cut algorithm for the commodity constrained split delivery vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 64: 1-10.
- [6] XU P J, ALLGOR R, GRAVES S C. Benefits of reevaluating real-time order fulfillment decisions[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2009, 11(2): 340-355.
- [7] CATALÁN A, FISHER M. Assortment allocation to distribution centers to minimize split customer orders[EB/OL]. SSRN Electronic Journal, 2012, doi:10.2139/ssrn.2166687.
- [8] 刘明, 祖峰, 陈中民, 等. 基于产品相关性的线上销售平台最小拆单率问题研究[J]. *物流技术*, 2023, 42(4): 88-91.
LIU M, ZU F, CHEN Z M, et al. Research on minimum order splitting rate of online sales platform based on product relevance [J]. *Logistics Technology*, 2023, 42(4): 88-91.
- [9] ZHANG Y K, HUANG M F, HU X P, et al. Package consolidation approach to the split-order fulfillment problem of online supermarkets[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2018, 69(1): 127-141.
- [10] 李建斌, 王莹莹, 李明康, 等. 医药电商考虑信息动态更新和最小化拆单率的订单重分配优化研究[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(3): 38-47.
LI J B, WANG Y Y, LI M K, et al. Research on order reallocation optimization of pharmaceutical E-commerce considering dynamic update of information and minimizing order splitting rate[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(3): 38-47.
- [11] 钟丽文, 姜同强. 基于改进贪婪关联算法的在线零售商优化拆单问题[J]. *工业工程*, 2021, 24(2): 134-140.
ZHONG L W, JIANG T Q. Online retailer optimal splitting problem based on improved greedy association algorithm [J]. *Industrial Engineering Journal*, 2021, 24(2): 134-140.
- [12] 黄敏芳, 李鲁迪, 胡祥培. 大型网上超市拆分订单基于分拨中心的合并配送时空网络优化方法[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(5): 163-172.
HUANG M F, LI L D, HU X P. Time-space network optimization method for split order consolidation on sorting center of large-scale online supermarket[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2021, 35(5): 163-172.
- [13] ZHU S, HU X P, HUANG K, et al. Optimization of product category allocation in multiple warehouses to minimize splitting of online supermarket customer orders[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 290(2): 556-571.
- [14] 谢天保, 雷西玲, 席文玲. 多物流中心协同配送车辆调度模型研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(29): 203-206.
XIE T B, LEI X L, XI W L. Study of logistics cooperating distribution scheduling mode [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(29): 203-206.
- [15] 张源凯, 黄敏芳, 胡祥培. 网上超市订单分配与物流配送联合优化方法[J]. *系统工程学报*, 2015, 30(2): 251-258.
ZHANG Y K, HUANG M F, HU X P. Integrated optimization approach to order allocation and delivery problem of online supermarket[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(2): 251-258.
- [16] 肖玉徽, 楼振凯, 戴晓震. 带时间窗的多配送中心协同配送问题研究[J]. *数学的实践与认识*, 2018, 48(14): 171-177.
XIAO Y H, LOU Z K, DAI X Z. Study on collaborative distribution problem of multi-distribution with time windows [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2018, 48(14): 171-177.
- [17] 张艳菊, 欧丽萍. 多门店协同下的订单拆分与配送联合优化方法[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(9): 295-303.
ZHANG Y J, OU L P. Joint optimization method for order split and delivery based on multi-store collaboration [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(9): 295-303.
- [18] HARBAOUI I D, BEN ALAÏA E, BORNE P, et al. Optimisation of the multi-depots pick-up and delivery problems with time windows and multi-vehicles using PSO algorithm[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(14): 4201-4214.
- [19] KUMAR S, MAHAPATRA R P. Design of multi-warehouse inventory model for an optimal replenishment policy using a rain optimization algorithm[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2021, 231: 107406.
- [20] WANG Y, WANG X W, GUAN X Y, et al. A combined intelligent and game theoretical methodology for collaborative multicenter pickup and delivery problems with time window assignment[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 113: 107875.

[21] 朱姝,张博,胡祥培.“一地多仓”型网上超市多品订单的拆分优化决策方法[J].中国管理科学,2024,32(4):250-260.

ZHU S,ZHANG B,HU X P. Order splitting optimization method of multi-item order fulfillment in online supermarkets with multi-warehouses in a city[J]. Chinese Journal of Management Science,2024,32(4):250-260.

Operations Research and Cybernetics

A Study on Multi-Warehouse Fulfillment Problem of Multi-Item Orders Considering Dual-Class Splitting and Consignment Time

FAN Zhiqiang¹, ZHANG Ying¹, ZHANG Nian², DUAN Bingbing¹

(1. College of Business Administration, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003;

2. School of Management, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In response to the substantial expenses, significant disruptions, and considerable environmental impact resulting from order fulfillment on online platforms, a joint optimization model for order splitting and consolidation delivery was developed based on the “divide and conquer” principle. The model aims to minimize costs by fully leveraging multi-warehouse resources and consolidating deliveries at distribution centers. The innovative aspects of the model include: firstly, considering both quantity splitting and category splitting scenarios; secondly, establishing more realistic order dispatch time constraints; and thirdly, jointly optimizing order splitting and consolidation delivery. Through the application of fuzzy set theory, the fuzzy programming model is transformed clearly and impartially. Through case studies, the feasibility of the model has been verified. The experimental results show that compared with the existing models, the proposed model has more advantages in controlling order fulfillment costs, reducing customer disturbances and reducing environmental pollution. At the same time, the sensitivity analysis shows that the order fulfillment cost is positively correlated with the number of categories and negatively correlated with the inventory.

Keywords: item splitting; quantity splitting; consignment time constraint; joint optimization; mixed integer programming model

(责任编辑 黄 颖)