

# 基于复合相似度的订单分批启发式种子算法

肖可<sup>1</sup>, 谢勇<sup>1\*</sup>, 王红卫<sup>1,2</sup>, 高海龙<sup>1</sup>, 王正国<sup>3</sup>

(1. 华中科技大学人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学管理学院, 湖北武汉 430074; 3. 武汉理工大学物流工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 针对基于客户服务质量的配送中心的订单分批优化问题, 建立了以拣选时间和订单延迟时间总和最小为目标的订单分批优化模型, 综合考虑订单品项相似度和交货期相似度, 提出了一种订单复合相似度度量方法, 并设计出基于复合相似度的订单分批启发式种子算法, 在传统启发式种子算法的基础上增加了对客户服务水平的考虑。仿真实验表明, 模型和方法能明显缩短订单拣选时间和延迟时间总和, 在保证订单拣选效率的同时, 也能明显提高客户服务水平。

**关键词:** 订单分批; 交货期; 启发式种子算法; 配送中心

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2020)06-0796-10

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2020.06.007

## Order batching heuristic seed algorithm based on compound similarity of orders

Xiao Ke<sup>1</sup>, Xie Yong<sup>1\*</sup>, Wang Hongwei<sup>1,2</sup>, Gao Hailong<sup>1</sup>, Wang Zhengguo<sup>3</sup>

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to address order batching optimization in distribution center based on customer service quality, this paper develops an order batching model, which minimizes the sum of order picking time and order tardiness. This paper also proposes an order compound similarity measure method which is based on a new seed heuristic order batching algorithm. The algorithm is designed considering both order item similarity and due date similarity, which increases consideration of customer service level based on traditional heuristic seed algorithm. Finally, the simulation experiments prove that the new model and method can significantly reduce the total of order picking time and the order tardiness, which improves order picking efficiency and customer service level.

**Key words:** order batching; due date; heuristic seed algorithm; distribution center

## 1 引言

随着电商业务的兴起与发展, 电商配送中心订单呈现出高频次、小批量和多品种的特征。订单拣选日益

收稿日期: 2019-09-12; 修订日期: 2020-08-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71771096); 国家自然科学基金创新群体资助项目(71821001); 华中科技大学中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2017KFYXJJ178).

\*通信作者

成为配送中心运营的关键环节. 据统计, 拣选作业的工作量在配送中心总工作量中占比 60%, 作业成本占比高达 50% ~ 75%<sup>[1,2]</sup>. 在订单拣选领域展开的研究主要集中在货位分配<sup>[3,4]</sup>、订单分批<sup>[5-7]</sup>、拣选路径优化<sup>[8]</sup>和作业分区<sup>[9]</sup>等几个方面. 国内外学者普遍认为缩短配送中心拣选作业总时间的有效方式就是进行合理的订单分批<sup>[5-7]</sup>. 订单分批过程提供了客户订单拣选最经济的方法, 使拣选人员能在一次拣选作业中取出多个客户订单要求的货物<sup>[5]</sup>. 在当前电商运营环境下, 客户订单通常会被要求在一定交货期内完成<sup>[10,11]</sup>, 如果延迟交货会导致客户服务水平下降, 顾客满意度降低. 准时和快速配送是提高客户服务水平的关键, 也成为配送中心竞争的焦点. 因此, 配送中心既需要优化订单分批过程来提高拣选效率<sup>[6]</sup>, 也需要满足订单的交货期来提高客户服务水平<sup>[12]</sup>, 在客户服务水平和拣选效率之间取得平衡. 目前, 订单分批的研究更多集中在提高拣选效率方面, 最小化拣选距离或拣选时间成为订单分批算法的最常见目标<sup>[5,7]</sup>, 而针对改善客户服务水平的研究相对较少. 而在电商环境下, 客户对商品到达时间更为敏感<sup>[13]</sup>, 因此, 有必要研究考虑客户服务水平的订单分批优化方法.

当前, 对订单分批模型的研究主要围绕提高拣选效率和减少订单延迟展开. 在以减少订单延迟时间为优化目标的订单分批研究中, Chen 等<sup>[14]</sup>以最小化订单延迟时间为目标建立了订单分批、排序和路径优化问题的 IOBSRP 模型, 并结合遗传算法和蚁群算法进行求解. Scholz<sup>[15]</sup>以最小化订单延迟时间为目标, 研究了订单分批与排序问题, 并采用变邻域下降算法求解. 这些研究仅考虑客户服务水平, 忽视了对拣选效率的优化. 另一部分学者综合考虑订单分批模型中拣选时间和订单延迟时间的联合优化问题. 王雄志等<sup>[16]</sup>以最小化拣选时间和订单延迟时间的加权和为目标建立了一个整数规划模型, 采用遗传算法求得满意解; 王艳丽<sup>[17]</sup>以拣选时间以及订单延迟时间加权最小为目标建立订单分批数学优化模型, 设计了改进包络算法求解订单分批问题. 上述订单分批问题研究没有考虑订单之间的相似度, 当订单规模比较大时, 求解算法的计算复杂度也会提高<sup>[1]</sup>.

在以提高拣选效率为目标的订单分批研究中, 大部分学者基于订单相似度进行订单分批问题研究. Chen 等<sup>[18]</sup>提出了一种基于数据挖掘的订单分批算法, 通过订单之间品项的重合度来衡量订单的接近程度, 并建立了每批订单最大相关度的数学模型. 张珺<sup>[19]</sup>构建了最大化相似度为目标的订单分批模型, 用改进种子算法构建基于相似度的订单聚类规则. Li<sup>[6]</sup>建立了以最小化拣选距离为目标的订单分批模型, 采用基于通道相似度的启发式算法求解. 然而, 现有订单相似度分批研究主要侧重于优化拣选效率, 在相似度中没有考虑交货期因素, 导致在订单批次拣选过程中会出现订单延迟, 使客户服务水平明显下降. 综上所述, 现有的启发式种子算法更多地考虑了订单之间的品项相似度, 基于这种相似度进行订单分批能有效缩短订单拣选时间, 但是, 对于处理订单延迟问题却无能为力. 因此, 有必要将订单的交付期作为重要因素考虑进来, 重新定义订单相似度并设计新的订单分批算法.

本文以典型的单区型配送中心仓库为研究对象, 建立了以订单拣选时间和延迟时间总和最小为目标的订单分批优化模型, 综合考虑订单品项相似度和交货期相似度, 提出了一种订单复合相似度度量方法, 并设计出基于复合相似度的订单分批启发式种子算法. 最后, 通过仿真实验证明新的模型和方法能明显缩短订单拣选时间和延迟时间总和, 在保证订单拣选效率的同时, 也能明显提高客户服务水平.

## 2 问题描述与模型建立

### 2.1 问题描述与假设

本文以典型的单区型配送中心为研究对象<sup>[20]</sup>, 配送中心拣货区如图 1 所示. 假设共有 16 排货架和 8 条主要的通道, 每条通道两边各有 10 个货位, 仓库内共有 160 个货位, 每个货位存放唯一一种货物, 货位编号和商品品项一一对应.

配送中心订单分批拣选流程如图 2 所示, 订单分批拣选问题一般可分为订单到达、订单分批及拣货路径优化三个环节, 具体可描述为, 某一时间段配送中心有多个动态到达的订单需要进行拣选, 每个订单  $O_i (i = 1, 2, \dots, n)$  中包括货物品项、数量和交货期等信息. 订单分批是按照一定规则 (如订单按之间的

品项相似度、通道相似度等) 将一定数量的订单合并成若干个批次, 以便按照批次进行批量拣选. 订单批次拣选过程中拣选人员需根据货物品项的存储位置决定拣选顺序及拣货路径, 以尽可能减少拣货行走距离, 提高拣选效率. 一般常见的拣选路径策略有 S 型路径策略、返回策略和中点返回策略等等. 但是由于 S 型路径策略优化效果较好<sup>[20,22]</sup>, 因此, 本文采用 S 型路径策略.

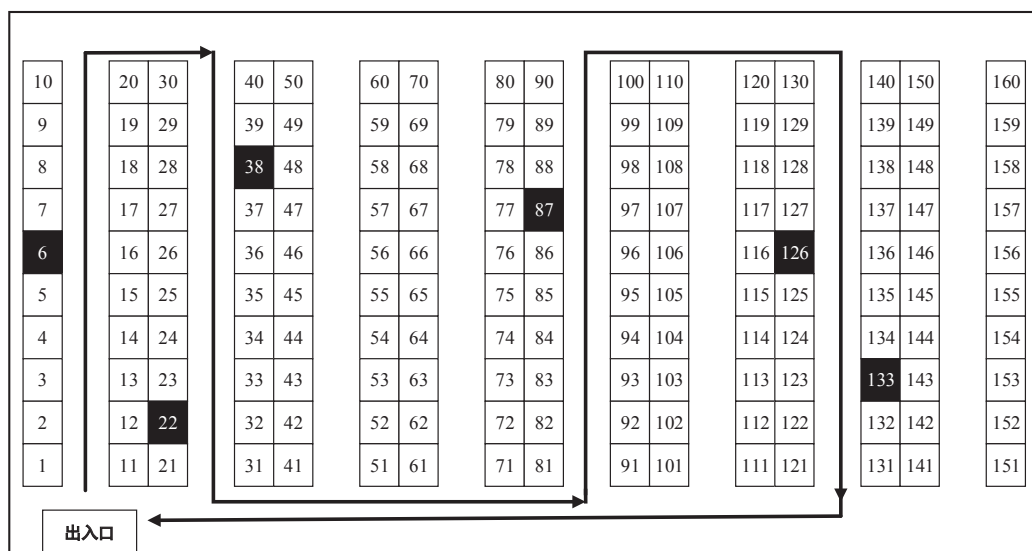


图 1 订单拣选区域布局图

Fig. 1 The layout of order picking area

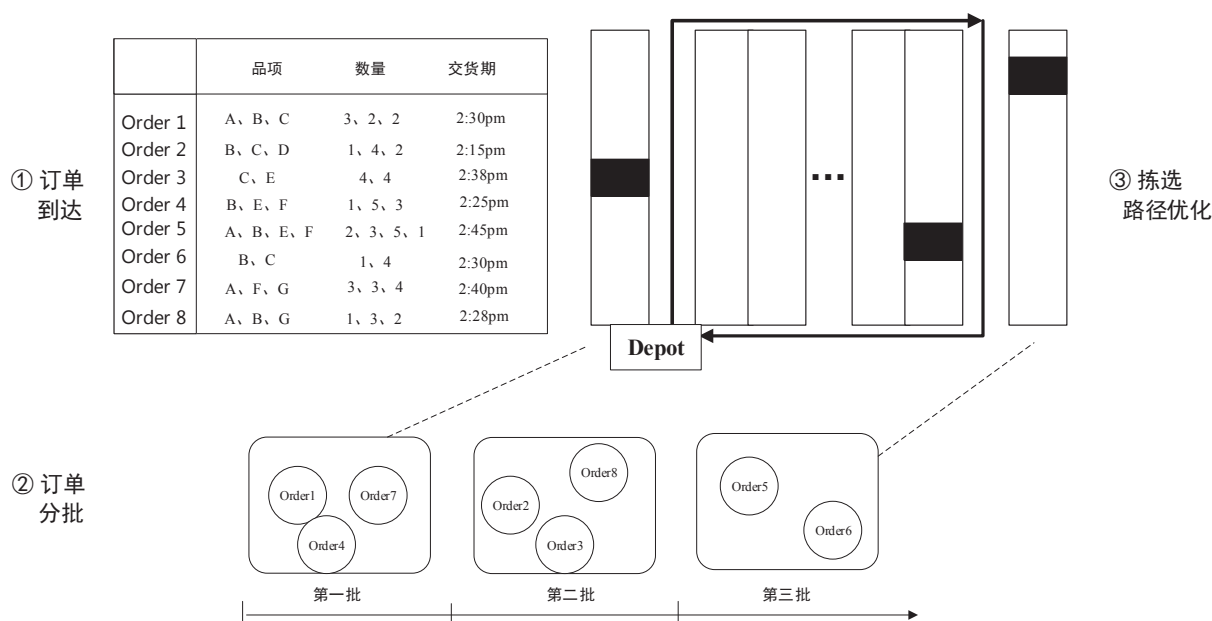


图2 订单分批拣选流程

Fig. 2 The process of order batching and picking routing

为了建立订单分批优化问题的数学模型,不失一般性,作如下假设:

- 1) 一个订单只能划分到一个批次, 订单不允许被分割成多个批次;
- 2) 每个批次包含货物的总体积和总重量不超过拣选设备的容量和载重量限制;
- 3) 拣选人员或拣选设备的移动速度保持不变; 拣选人员拣取货物的时间为常量, 因此不考虑拣选人员拣取货物的时间;
- 4) 拣选人员都从出入口出发, 拣选完成后一律回到出入口, 整个作业过程形成一个闭合回路.

## 2.2 考虑交货期的订单分批优化模型

模型参数和决策变量定义见表 1.

表 1 模型参数和决策变量的符号设定与含义解释

Table 1 Symbol setting and meaning interpretation of model parameters and decision variables

符号	说明
$n$	订单总数
$m$	批次总数
$i$	订单索引
$j$	批次索引
$O$	订单集, $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$
$B$	订单形成的分批集, $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$
$V$	拣选设备最大容量
$W$	拣选设备最大载重量
$v$	拣选人员和拣选设备的行走速度
$d_i$	订单 $O_i$ 的交货期
$w_i$	订单 $O_i$ 包含的商品总重量
$v_i$	订单 $O_i$ 包含的商品总体积
$u_x$	拣选点 $x$ 的拣选顺序, $x = \{1, 2, \dots, N\}$
$D_{jxy}$	在拣选批次 $j$ 中货物 $x$ 与 $y$ 的距离. 由于 $D_{jxy}$ 计算过程较为复杂, 具体可参考文献[24,25]
$R_j^1$	拣选批次 $j$ 形成的拣选路径上从出入口到第一个拣选货物货位的距离
$R_j^2$	拣选批次 $j$ 形成的拣选路径上最后一个拣选货物的货位到出入口的距离
$F_i$	订单 $O_i$ 的拣选完工时间
$N$	每个批次所包含的品项数量
$x_{ij}$	订单 $O_i$ 是否在批次 $j$ 中
$Y_{jxy}$	在拣选批次 $j$ 中拣选路径上货物 $x$ 和 $y$ 是否相邻
$T_j^p$	批次 $j$ 的拣选作业时间
$T_i^t$	订单 $O_i$ 的延迟时间, $T_i^t = \max\{0, F_i - d_i\}$

假设第一个批次开始进行拣选的时间是  $S_1$ , 任一批次  $j$  的拣选作业的时间

$$T_j^p = \frac{1}{v} \left( \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N D_{jxy} Y_{jxy} + R_j^1 + R_j^2 \right),$$

则完成所有订单拣选的时间为  $S_1 + \sum_{j=1}^m T_j^p$ .

假设订单  $O_i$  属于第  $k$  个批次, 订单  $O_i$  的完成时间是第一个批次的开始时间和订单  $O_i$  所属批次的拣选时间与之前批次的拣选时间之和的总和, 即第一个批次开始时间与前  $k$  个批次拣选时间之和, 即  $F_i = S_1 + \sum_{j=1}^k T_j^p x_{ik}$ , 那么订单  $O_i$  的延迟时间是  $T_i^t = \max \left\{ 0, \left( S_1 + \sum_{j=1}^k T_j^p x_{ik} \right) - d_i \right\}$ . 根据以上分析, 可建立以订单拣选时间和延迟时间总和最小为目标的订单分批优化模型

$$\text{Min } Z = \frac{1}{v} \sum_{j=1}^m \left( \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N D_{jxy} Y_{jxy} + R_j^1 + R_j^2 \right) + \sum_{i=1}^n \max \left\{ 0, \left( S_1 + \sum_{j=1}^k T_j^p x_{ik} \right) - d_i \right\}, \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n w_i x_{ij} \leq W, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n v_i x_{ij} \leq V, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

$$u_x - u_y + NY_{jxy} \leq N - 1, 1 \leq x, y \leq N, x \neq y, \forall j, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

$$\sum_{x=1}^N Y_{jxy} = 1, y = 1, 2, \dots, N, x \neq y, \quad (6)$$

$$\sum_{y=1}^N Y_{jxy} = 1, x = 1, 2, \dots, N, x \neq y, \quad (7)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & O_i \in j, \\ 0, & O_i \notin j, \end{cases} \quad (8)$$

$$Y_{jxy} = \begin{cases} 1, & \text{在拣选批次 } j \text{ 中拣选完货物 } x \text{ 后立即拣选货物 } y \\ 0, & \text{在拣选批次 } j \text{ 中拣选完货物 } x \text{ 后不拣选货物 } y, \end{cases} \quad (9)$$

其中式(1)为优化模型,表示订单分批后的总目标是拣选时间和订单延迟时间总和最小化.约束条件(2)表示任一批次包含的商品总重量不超过拣选设备的最大载重量;约束条件(3)表示任一批次包含的商品总体积不超过拣选设备的最大容量;约束条件(4)确保拣选路线形成一个闭合回路;约束(5)表示一个订单只能属于一个批次,订单不能分割到不同批次中;约束条件式(6)和式(7)表示任意一种货物只能在一个批次中且只被拣选一次;约束条件(8)表示决策变量  $x_{ij}$  的取值范围为  $\{0, 1\}$ ,当订单  $O_i$  被归入到批次  $j$  时,  $x_{ij}$  为 1,否则为 0;约束条件(9)表示拣选完货物  $x$  后是否可以拣选货物  $y$ .

### 3 算法设计

本文考虑拣选时间与订单延迟时间相结合的订单分批模型和优化算法.由于现有的启发式种子算法只考虑了订单之间的品项相似度,基于这种相似度进行订单分批未将订单的交货期因素考虑进来,难以有效减少订单的延迟时间.本文针对订单延迟时间问题,提出了订单交货期相似度的概念和度量方法,并结合传统的订单品项相似度,定义了一种订单复合相似度及其度量方法,并在此基础上提出了一种新的基于订单复合相似度的启发式种子算法,在订单分批策略中综合考虑订单的品项相似度和订单交货期相似度,设计一种基于复合相似度的订单分批策略,使得订单的拣选时间与延迟时间可以达到综合优化.

#### 3.1 订单复合相似度

订单相似度是指订单包含的各属性相似程度的数值度量<sup>[6,18]</sup>.一般来讲,订单包含了物品品项、物品数量、交货期等诸多信息,通过对订单相似度进行计算,把相似度高的订单分为一批从而实现订单批量拣选,能大大减少重复拣选,缩短拣选时间.现有依据订单相似度对订单进行分批的研究主要考虑品项相似度<sup>[18]</sup>和通道相似度<sup>[6]</sup>,多以提高拣选效率为优化目标,而忽视了订单交货期的影响.本文综合考虑订单品项相似度和订单交货期相似度来构建订单复合相似度并据此进行订单分批,在保证配送中心拣选效率同时,也尽可能缩短订单延误时间,从而进一步提升配送中心的物流服务水平 and 客户满意度.

订单复合相似度以订单交货期相似度  $S_{ij}^T$  和订单品项相似度  $S_{ij}^O$  为基础,综合衡量订单之间的相似程度.订单  $O_i$  和订单  $O_j$  的复合相似度可定义为

$$S_{ij}^C = \omega_1 S_{ij}^T + \omega_2 S_{ij}^O, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

其中  $S_{ij}^T$  表示任意两个订单  $O_i$  和  $O_j$  之间的交货期相似度,

$$S_{ij}^T = 1 - |d_i - d_j|/D, i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

其中  $d_i, d_j$  分别表示订单  $O_i$  和订单  $O_j$  的交货期,  $|d_i - d_j|$  越小,说明两个订单的交货期越接近,相似度越

大.  $D = \max\{|d_i - d_j|\}$  表示订单集  $O$  中两个订单交货期之差的最大绝对值, 用于进行归一化处理.

令  $S_{ij}^O$  表示任意两个订单  $O_i$  和  $O_j$  之间的品项相似度, 定义如下

$$S_{ij}^O = |\text{OI}_i \cap \text{OI}_j| / |\text{OI}_i \cup \text{OI}_j|, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

其中  $\text{OI}_i$  是拣选订单  $O_i$  包含的品项编号,  $\text{OI}_j$  是拣选订单  $O_j$  包含的品项编号,  $|\text{OI}_i \cap \text{OI}_j|$  是订单  $O_i$  和订单  $O_j$  具有的相同品项数量,  $|\text{OI}_i \cup \text{OI}_j|$  是订单  $O_i$  和订单  $O_j$  合并后拣选人员需要拣选的所有品项数量.

以  $\omega_1, \omega_2$  分别表示在复合相似度中交货期相似度和品项相似度的权重. 若  $\omega_1 > \omega_2$ , 说明配送中心关注重点在于减少订单延迟时间, 客户服务水平优先; 若  $\omega_1 < \omega_2$ , 说明配送中心更多关注通过相同品项来减少重复路线的拣选, 拣选效率优先.

通过将订单品项相似度和交货期相似度两者结合并赋予不同的权重系数来构建复合相似度进行订单分批, 并与订单分批优化模型紧密联系, 能有效地对拣选时间与订单延迟时间相结合的订单分批问题进行建模和求解.

### 3.2 基于复合订单相似度的启发式种子算法

本文构建的基于复合订单相似度的启发式种子算法是对传统种子算法的改进. 传统的种子算法在订单相似度度量阶段只是考虑了剩余订单与种子订单之间的品项相似度, 未考虑不同的订单具有不同的交货期. 仅仅根据订单品项相似度进行分批, 在很大程度上将会影响订单的延迟时间. 本文提出的启发式种子算法综合考虑订单品项相似度和交货期相似度, 并构建订单复合相似度进行订单分批, 通过计算所有批次的拣选时间和延迟时间综合评价拣选作业效率和客户服务水平.

由于模型中订单分批的总目标是拣选时间和订单延迟时间总和最小, 因此考虑交货期较小的订单应优先开始进行拣选, 才能尽量减少订单延迟时间, 所以通常选择交货期最小的订单为初始种子订单. 基于复合订单相似度的启发式种子算法流程如下:

**步骤 1** 初始化, 订单分批集合为空;

**步骤 2** 初始种子订单的选择. 根据选择种子订单的标准之一, 选择交货期最小的订单作为种子订单, 并确定为初始批量, 同时将  $O_i$  从待分批订单集合中移出;

**步骤 3** 订单复合相似度计算. 根据式(10)在待分批订单中逐一计算与种子订单  $O_i$  复合相似度  $S_{ij}^C = \omega_1 S_{ij}^T + \omega_2 S_{ij}^O$ , 根据  $S_{ij}^C$  的大小将订单降序排列, 如果多个订单与  $O_i$  具有相同的复合相似度, 则再按照交货期从小到大的顺序排列;

**步骤 4** 订单合并. 选取与种子订单  $O_i$  复合相似度最高、交货期最小的订单  $O_j$ , 根据约束条件式(2)和式(3)判断该订单加入批次后是否满足容量和载重约束. 若满足约束, 合并  $\{O_i, O_j\}$  到一个批次, 将剩下的排序的订单依次加入种子订单中, 直到超出拣选设备的容量和载重约束, 将加入的订单集和种子订单一起生成拣选批次并输出;

**步骤 5** 如果待分批集合中只剩下订单  $O_{i_t}$ , 则直接输出拣选批次, 否则返回步骤 2, 直到所有订单都完成分批;

**步骤 6** 根据输出的批次顺序, 依次按照 S 型拣选路径进行拣选;

**步骤 7** 根据目标函数(1)计算输出的所有批次的拣选时间  $T_p$ 、所有订单的延迟时间  $T_t$  及其总和.

## 4 仿真实验与结果分析

为了评估算法的有效性, 选取基于复合相似度的启发式种子算法和基于品项相似度的传统种子算法进行对比, 主要选取订单拣选时间、订单延迟时间以及拣选时间和延迟时间总和等几个性能指标作为比较对象. 另外, 在复合相似度中通过设置不同的权重考察订单相似度权重系数对算法结果的影响. 仿真环境设置为仓库拣选货位的长度和宽度为 1 m, 通道的长度为 10 m, 宽度为 1 m. 通过对上海某公司配送中心一段

时期内实际订单数据进行分析,抽象出切合实际情况的订单规律,通过 Matlab 模拟生成电商配送中心订单集. 每个订单包含的产品种类数量服从 $[1, 10]$ 上的均匀分布,每种物品的数量服从 $[1, 5]$ 上的均匀分布,订单的交货期服从 $[T_L, T_H]$ 上的均匀分布,其中  $T_L$  为先到先服务分批规则下最小的批次拣选时间,  $T_H$  为所有批次的拣选时间总和<sup>[16, 23]</sup>. 拣选设备的最大载重量设置为 140 个单位,拣选人员和拣选设备的行走速度为 40 m/min,采用 S 型拣选路径策略进行拣选.

#### 1) 不考虑客户服务水平和考虑客户服务水平实验结果对比

客户服务水平由订单延迟时间衡量,将不考虑客户服务水平( $S_1$ )与考虑客户服务水平( $S_2$ )两种情况下所得实验结果进行对比分析. 不考虑客户水平时直接采取基于品项相似度的传统种子分批算法,其中交货期相似度权重系数  $\omega_1$  和品项相似度权重系数  $\omega_2$  分别取值为 0 和 1; 考虑客户水平情况下采取基于复合相似度的种子分批算法,其中交货期相似度权重系数  $\omega_1$  和品项相似度权重系数  $\omega_2$  分别取值为 0.5. 每种情况下,各进行 50 次仿真取最优解和平均值,仿真结果如表 2 所示.

表 2 不考虑客户服务水平( $S_1$ )和考虑客户服务水平( $S_2$ )实验结果对比  
Table 2 Comparison of results without considering the service level of customers ( $S_1$ ) and considering the service level of customers ( $S_2$ )

		$S_1$ / min		$S_2$ / min		$(S_1 - S_2)/S_1$ (%)	
		最优解	平均值	最优解	平均值	最优解	平均值
拣选 时间	$n = 100$	16.95	17.45	18.20	18.70	-7.37	-7.16
	$n = 200$	31.40	31.93	32.75	33.36	-4.30	-4.48
	$n = 300$	46.50	47.18	49.00	49.73	-5.38	-5.40
延迟 时间	$n = 100$	250.12	251.66	49.80	50.68	80.09	79.86
	$n = 200$	958.90	960.14	137.90	138.09	85.62	85.62
	$n = 300$	2 006.90	2 008.67	219.91	221.37	89.04	88.98
时间 总和	$n = 100$	267.07	269.11	68.00	69.38	75.54	74.22
	$n = 200$	990.30	992.07	170.65	171.45	82.77	82.72
	$n = 300$	2 053.40	2 055.85	268.91	271.10	86.90	86.81

由表 2 可以看出,在考虑客户服务水平的情况下,当订单数量从 100 增加到 300 时,订单延迟时间减少比例从 79.86% 增加到 88.98%,拣选时间与延迟时间总和减少比例从 74.22% 增加到 86.81%. 可见,在考虑客户服务水平的情况下,订单延迟时间以及拣选时间与延迟时间总和会明显缩短;而且随着订单规模的增加,优化效果会越来越明显. 值得指出的是,考虑客户服务水平后,拣选时间会略有增加,这是因为在复合相似度情形下,在考虑品项相似度的基础上,增加了交货期相似度,订单分批后每批次订单之间的品项相似度无法达到最优(不考虑客户服务水平时的情形),因此会导致相应的拣选时间会略有增加. 这表明,订单延迟时间、拣选时间与延迟时间总和的大幅减少是以拣选时间的略微增加为代价,但是总体绩效会有提升. 值得指出的是,上述结论是在 S 路径策略情形下得到的. 基于相同的订单规模和参数设置,通过实验分析和验证,在返回策略、中点返回策略等路径策略下,上述结论也同样成立.

总体来说,如果只考虑配送中心拣选效率,可采用基于品项相似度的种子算法分批策略;如果既需要提高拣选作业效率,也需要快速响应客户需求,则应采用本文提出的基于复合相似度的启发式种子算法,它能有效的减少订单的迟滞时间以及拣选时间和订单延迟时间总和,综合优化效果较明显.

#### 2) 订单相似度权重系数的影响

在订单复合相似度中,  $\omega_1$  与  $\omega_2$  分别表示订单交货期相似度权重和订单品项相似度权重,它们的取值会影响种子算法的分批结果,从而影响拣选时间、订单延迟时间. 在订单数分别为 100, 200 和 300 的情况下,分别从 0 到 1 按 0.1 的步长取不同的值,每种情况下各进行 50 次仿真取平均值,仿真结果如表 3 所示.

不同订单规模下延迟时间变化情况如图 3 所示. 图 3 表明,随着交货期相似度权重系数的增大(即  $\omega_1$  由 0.0 增长到 1.0 时),订单延迟时间会减少;而且随着订单规模的增加,订单延迟时间减小的幅度会越来越大,客户服务水平的提高越来越明显,但是,在  $\omega_1$  取某个临界值( $\omega_1 = 0.5$ )时,延迟时间减少逐渐

趋于平缓.

表3 不同相似度权重系数下实验结果

Table 3 Experimental results under different similarity weight coefficients

$\omega_1$	$\omega_2$	拣选时间 / min			延迟时间 / min		
		$n = 100$	$n = 200$	$n = 300$	$n = 100$	$n = 200$	$n = 300$
0.0	1.0	16.31	32.08	49.92	228.50	932.19	2 246.73
0.1	0.9	16.48	32.21	50.53	194.15	742.16	1 752.00
0.2	0.8	16.75	32.30	50.83	122.95	449.55	1 332.97
0.3	0.7	16.92	33.02	51.10	91.03	384.43	977.98
0.4	0.6	17.25	33.17	51.70	73.87	280.50	663.05
0.5	0.5	17.58	33.53	52.17	57.79	178.23	395.19
0.6	0.4	17.83	34.00	52.75	44.16	144.62	272.48
0.7	0.3	18.25	34.25	53.42	38.74	74.90	156.76
0.8	0.2	18.42	36.17	54.83	33.09	53.90	91.87
0.9	0.1	19.40	36.67	55.83	21.64	47.29	71.23
1.0	0.0	19.67	38.25	57.12	8.34	28.90	29.48

不同订单规模下拣选时间变化情况如图4所示. 图4表明, 随着品项相似度权重系数的减小(即  $\omega_2$  由1.0减少到0.0时), 拣选时间会逐渐增加; 而且随着订单规模的增加, 拣选时间增长幅度相对变大, 拣选效率的损失逐渐突显.

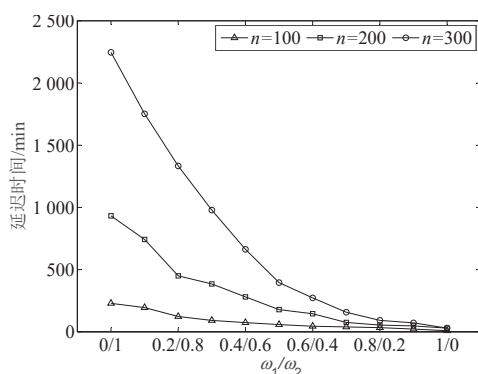


图3 不同订单规模下延迟时间变化情况

Fig. 3 Variation of delay time under different order sizes

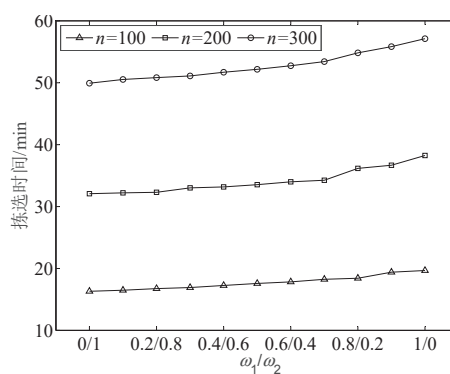


图4 不同订单规模下拣选时间变化情况

Fig. 4 The change of picking time under different order sizes

因此, 对电商配送中心来说, 若仅仅根据订单品项相似度进行订单分批, 随着订单规模增加, 订单延迟时间将急剧增长, 客户服务水平会急剧下降; 但若综合考虑订单品项相似度和交货期相似度并赋予适合的权重系数, 构建订单复合相似度进行分批, 将大大缩短订单延迟时间, 使订单拣选时间和延迟时间总和达到一种优化平衡的状态, 有利于在保证配送中心运作效率的情况下, 大幅提高客户满意度.

## 5 结束语

本文针对电商配送中心拣选作业效率和订单及时交付问题, 构建了考虑客户服务水平的订单分批优化模型, 相对于传统的模型主要集中在减少拣选时间上, 本文提出的模型更多地关注缩短订单延迟时间, 在综合考虑订单品项相似度和交货期相似度的基础上, 提出了一种订单复合相似度度量方法和新的订单分批启发式种子算法, 能使拣选时间和订单延迟时间总和达到优化平衡的状态. 实验结果表明本文提出的算法能明显缩短订单延迟时间以及拣选时间与延迟时间总和, 且随着订单规模的增加, 优化效果更加明显. 本文用



订单延迟时间来衡量客户服务水平,未来可以考虑用延期的订单数量作为衡量客户服务水平的标准,构建新的模型和算法,这是值得进一步研究的重要问题。

### 参考文献:

- [1] De K, Le-Duc T, Roodbergen K J. Design and control of warehouse order picking a literature review. *European Journal of Operational Research*, 2007, 182(2): 481–501.
- [2] 赵小松, 武锦慧, 何 桢. 考虑疲劳和工作负荷的人工拣选货品排程研究. *系统工程学报*, 2015, 30(5): 703–710.  
Zhao X S, Wu J H, He Z. Research on the work-rest scheduling of the manual picking with workers' fatigue and workload. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(5): 703–710. (in Chinese)
- [3] Larco J A, De K, Roodbergen K J, et al. Managing warehouse efficiency and worker discomfort through enhanced storage assignment decisions. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(21): 6407–6422.
- [4] Bahrami B, Aghezzaf E, Limere V. Enhancing the order picking process through a new storage assignment strategy in forward-reserve area. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(21): 6593–6614.
- [5] Gademann N, Velde V D S. Batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse. *IIE Transactions* 2005, 37(1): 63–75.
- [6] Li J B, Huang R H, Dai J B. Joint optimisation of order batching and picker routing in the online retailer's warehouse in China. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(2): 447–461.
- [7] Menendez B, Bustillo M, Pardo E G, et al. General variable neighborhood search for the order batching and sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, 2017, 263(1): 82–93.
- [8] Chen F Y, Wang H W, Xie Y, et al. An ACO-based online routing method for multiple order pickers with congestion consideration in warehouse. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2016, 27(2): 389–408.
- [9] Wu Y Y, Wu Y H. Taboo search algorithm for item assignment in synchronized zone automated order picking system. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(4): 860–866.
- [10] 陈淮莉, 卫亚运, 李景瑜. 交付期约束下的网络零售配送多时隙选项定价. *系统工程学报*, 2016, 34(4): 515–525.  
Chen H L, Wei Y Y, Li J Y. Dynamic pricing of time slots for internet retailing under delivery time constraint. *Journal of Systems Engineering*, 2016, 34(4): 515–525. (in Chinese)
- [11] 谭春桥, 易文桃. 双渠道供应链定价与网络直销交货期策略. *系统工程学报*, 2019, 34(5): 683–699.  
Tan C Q, Yi W T. Pricing and lead time decisions in a dual-channel supply chain. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(5): 683–699. (in Chinese)
- [12] Sebastian H. Order batching and sequencing for the minimization of the total tardiness in picker-to-part warehouses. *Flexible Services and Manufacturing*, 2015, 27(1): 86–114.
- [13] 李 琳, 刘士新, 唐加福. 电子商务中订单配送优化模型及两阶段算法. *系统工程学报*, 2011, 26(2): 237–243.  
Li L, Liu S X, Tang J F. Optimal model and two-stage algorithm of order delivery problem in electronic commerce. *Journal of Systems Engineering*, 2011, 26(2): 237–243.
- [14] Chen T L, Cheng C Y, Chen Y Y, et al. An efficient hybrid algorithm for integrated order batching, sequencing and routing problem. *International Journal of Production Economics*, 2015, 159: 158–167.
- [15] Scholz A, Schubert D, Wascher G. Order picking with multiple pickers and due dates-simultaneous solution of order batching, batch assignment and sequencing and picker routing problems. *European Journal of Operational Research*, 2017, 63(2): 461–478.
- [16] 王雄志, 王国庆. 订单时间具有约束的分批配货作业优化. *武汉大学学报*, 2009, 42(3): 400–404.  
Wang X Z, Wang G Q. Batching orders optimization with due date time constraints in warehouse by minimizing travel time and lateness. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(3): 400–404. (in Chinese)
- [17] 王艳丽. 配送中心拣选作业优化研究. 长春: 吉林大学, 2017.  
Wang Y L. Research on Order Picking Operation Optimization in Distribution Center. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [18] Chen M C, Wu H P. An association-based clustering approach to order batching considering customer demand patterns. *Omega: International Journal of Management Science*, 2005, 33(4): 333–343.
- [19] 张 珺. 电子商务环境下并行分区拣选系统的订单合并优化研究. 大连: 大连理工大学, 2014.  
Zhang J. Study on Order Batching Strategy Optimization under E-commerce Synchronized Zone Order Picking System. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)

- [20] Zhang J, Wang X, Chan F S, et al. On-line order batching and sequencing problem with multiple pickers: A hybrid rule-based algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 45(Supplement C): 271–284.
- [21] De K, Van E S, Wolters M. Efficient order batching methods in warehouses. *International Journal of Production Research*, 1999, 37(7): 1479–1504.
- [22] 王旭坪, 张 珺, 马 骏. 考虑完成期限的电子商务在线订单分批模型及算法. *管理科学*, 2014, 27(6): 103–113.  
Wang X P, Zhang J, Ma J. A online order batching model and algorithm for e-commerce considering deadlines. *Journal of Management Science*, 2014, 27(6): 103–113. (in Chinese)
- [23] Elsayed E A, Lee M K. Order processing in automated storage/retrieval systems with due dates. *IIE Transactions*, 1996, 28(7): 567–577.
- [24] Cano J A, Correa-Espinal A A, Gómez-Montoya R A. An evaluation of picking routing policies to improve warehouse efficiency. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 2017, 8(4): 229–238.
- [25] Hong S, Kim Y A. A route-selecting order batching model with the s-shape routes in a parallel-aisle order picking system. *European Journal of Operational Research*, 2017, 257(1): 185–196.

#### 作者简介:

肖 可(1996—), 女, 湖北武汉人, 硕士, 研究方向: 物流系统优化与调度, Email: xk621628@163.com;  
谢 勇(1974—), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 研究方向: 物流系统仿真与优化, Email: xyhust@mail.hust.edu.cn;  
王红卫(1966—), 男, 浙江宁波人, 博士, 教授, 研究方向: 物流系统仿真与优化, 应急物流管理, Email: hwwang@hust.edu.cn;  
高海龙(1994—), 男, 河南周口人, 硕士, 研究方向: 物流系统优化与仿真, Email: 1330695688@qq.com;  
王正国(1975—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 研究方向: 物流系统优化与决策支持, Email: zgwang@whut.edu.cn.

\*\*\*\*\*

(上接第 772 页)

- [34] 林 强, 叶 飞. “公司+农户”型订单农业供应链的 Nash 协商模型. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(7): 1769–1778.  
Lin Q, Ye F. Coordination for ‘company+farmer’ contract-farming supply chain under Nash negotiation model. *System Engineering Theory and Practice*, 2014, 34(7): 1769–1778. (in Chinese)
- [35] 简惠云, 许民利. 风险规避下基于 Stackelberg 博弈与 Nash 讨价还价博弈的供应链契约比较. *管理学报*, 2016, 13(3): 447–453.  
Jian H Y, Xu M L. Composition of supply chain contracts based on Stackelberg game and Nash bargaining model with the assumption of risk-aversion. *Chinese Journal of Management*, 2016, 13(3): 447–453. (in Chinese)
- [36] 梁招娣, 陈小平, 孙延明. 基于多维度 Nash 协商模型的校企合作创新联盟利益分配方法. *科技管理研究*, 2015, 35(15): 203–207.  
Liang Z D, Chen X P, Sun Y M. The research about interests allocation of university—Enterprise innovation alliances based on Nash negotiation model. *Science and Technology Management Research*, 2015, 35(15): 203–207. (in Chinese)
- [37] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Economic*, 1979, 47(2): 263–292.
- [38] 隋博文, 黄智铭. 农村合作经济组织利益分配的 Raiffa 裁决. *系统科学学报*, 2017, 25(1): 104–107.  
Sui B W, Huang Z M. Research on raiffa ruling of profit distribution in the rural cooperative economic organizations. *Journal of System Science*, 2017, 25(1): 104–107. (in Chinese)

#### 作者简介:

焦 薇(1982—), 女, 山东济南人, 博士, 讲师, 研究方向: 现代物流与供应链管理, Email: jiaowei@ahut.edu.cn;  
倪 明(1974—), 男, 安徽桐城人, 博士, 教授, 研究方向: 管理系统工程, Email: xyznm96@163.com;  
吴知轩(1989—), 男, 浙江台州人, 硕士, 研究方向: 战略管理, 供应链管理, Email: zhixuan.wu89@outlook.com.