

3-15-2024

Modeling and Optimization of Smart Warehouse Order Sorting Considering Splitting Strategy

Yuze Xu

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China, 1072979947@qq.com

Linxuan Zhang

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China; Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100089, China, lxzhang@mail.tsinghua.edu.cn

Hui Li

School of Information, Central University of Finance and Economics, Beijing 102206, China

Ming Ge

Hong Kong Industrial Artificial Intelligence and Robotics Centre, Hong Kong 999077, China

See next page for additional authors

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



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

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

Modeling and Optimization of Smart Warehouse Order Sorting Considering Splitting Strategy

Abstract

Abstract: For an automatic vehicle sorting problem involving mixed sorting of two types of orders, an order splitting strategy and a method for batch adjustment of sub-orders after splitting are proposed by considering the phenomena of blockage of automatic guided vehicles (AGVs) and idleness of manual collection stations in the order sorting process. In addition, with the optimization objective of minimizing the total order completion time, an order sorting integer planning model with order splitting is established. An improved discrete grey wolf optimization algorithm is proposed to jointly optimize the three sub-problems of order batching, batch sorting, and product unloading location selection. Numerical experimental results show that the order splitting strategy leads to a significant reduction in the total order completion time, and the superiority of the proposed algorithm is verified by comparing it with the classical algorithm and other algorithms of the same type.

Keywords

order splitting, order batching, batch sorting, discrete grey wolf optimization algorithm, automatic vehicle sorting system

Authors

Yuze Xu, Linxuan Zhang, Hui Li, Ming Ge, and Wanyi He

Recommended Citation

Xu Yuze, Zhang Linxuan, Li Hui, et al. Modeling and Optimization of Smart Warehouse Order Sorting Considering Splitting Strategy[J]. *Journal of System Simulation*, 2024, 36(3): 564-577.

考虑拆分策略的智能仓库订单分拣建模与优化

徐毓泽¹, 张林鎔^{1,2*}, 李惠³, 葛明⁴, 何莞依⁴

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 清华大学 自动化系, 北京 100089;
3. 中央财经大学 信息学院, 北京 102206; 4. 香港工业人工智能及机械人研发中心, 香港 999077)

摘要: 针对一种两类订单混合分拣的自动小车分拣问题, 考虑其在订单分拣过程中出现的分拣 AGV(automatic guided vehicle)堵塞和人工收集站闲置的现象, 提出一种订单拆分的策略及拆分后子订单批次调整的方法, 并以总订单完工时间最小化为优化目标, 建立了订单拆分的订单分拣整数规划模型; 提出一种改进离散灰狼优化算法, 将订单分批、批次排序以及下架库位选取 3 个子问题进行联合优化。数值实验结果表明, 订单拆分策略使总订单完工时间显著减少, 并且通过与经典算法以及其他同类型算法的对比, 验证了所提算法的优越性。

关键词: 订单拆分; 订单分批; 批次排序; 离散灰狼优化算法; 自动小车分拣系统

中图分类号: TP278 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)03-0564-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0422

引用格式: 徐毓泽, 张林鎔, 李惠, 等. 考虑拆分策略的智能仓库订单分拣建模与优化[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(3): 564-577.

Reference format: Xu Yuze, Zhang Linxuan, Li Hui, et al. Modeling and Optimization of Smart Warehouse Order Sorting Considering Splitting Strategy[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 564-577.

Modeling and Optimization of Smart Warehouse Order Sorting Considering Splitting Strategy

Xu Yuze¹, Zhang Linxuan^{1,2*}, Li Hui³, Ge Ming⁴, He Wanyi⁴

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China; 2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100089, China; 3. School of Information, Central University of Finance and Economics, Beijing 102206, China;
4. Hong Kong Industrial Artificial Intelligence and Robotics Centre, Hong Kong 999077, China)

Abstract: For an automatic vehicle sorting problem involving mixed sorting of two types of orders, an order splitting strategy and a method for batch adjustment of sub-orders after splitting are proposed by considering the phenomena of blockage of automatic guided vehicles (AGVs) and idleness of manual collection stations in the order sorting process. In addition, with the optimization objective of minimizing the total order completion time, an order sorting integer planning model with order splitting is established. An improved discrete grey wolf optimization algorithm is proposed to jointly optimize the three sub-problems of order batching, batch sorting, and product unloading location selection. Numerical experimental results show that the order splitting strategy leads to a significant reduction in the total order completion time, and the superiority of the proposed algorithm is verified by comparing it with the classical algorithm and other algorithms of the same type.

收稿日期: 2023-04-07 修回日期: 2023-06-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1703103); 香港创科平台 InnoHK 资助项目(20213000116); 新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2022G042)

第一作者: 徐毓泽(1996-), 男, 硕士生, 研究方向为生产计划排程、物流分拣。E-mail: 1072979947@qq.com

通讯作者: 张林鎔(1966-), 男, 教授, 博士, 研究方向为产品研发信息化及其关键技术。E-mail: lxzhang@mail.tsinghua.edu.cn

Keywords: order splitting; order batching; batch sorting; discrete grey wolf optimization algorithm; automatic vehicle sorting system

0 引言

随着物流行业和电子商务的高速发展, 客户订单呈现出订单规模小、产品种类多、交货时间紧迫的新特征^[1-2]。同时客户对订单配送服务的要求提出了更短的交货时间和更高的服务质量。故能够实现更短的订单周期、更低物流成本和更好客户服务的企业将占据更多的市场份额。订单分拣是仓储物流中的一个环节, 其根据客户订单对产品的需求, 从存储设施中提取相应的产品以满足客户订单, 由于其被视为仓库绩效的关键决定因素, 因此经常成为研究的主题^[3]。然而传统依赖人工的仓储分拣系统具有出错率高、劳动成本高、效率低下的缺点^[4]。如今国内外各大企业, 如京东、亚马逊等, 都开始大力发展自动分拣系统。

自动导引小车(automatic guided vehicle, AGV)是一种安全性能高、功能强大的物流运输设备^[5], 已在仓储分拣、医疗废品分拣、图书分拣以及车间加工等^[6-9]领域得到广泛应用。采用AGV进行分拣的自动小车分拣系统(automatic vehicle sorting system, AVSS)能够真正的实现智能仓库的无人化运行^[10]。

提高订单分拣效率的主要方式之一就是订单分批分拣, 即按照预先设定的规则, 将一部分订单归为同一批次, 然后将每个批次订单的产品一起进行分拣, 同时确定各批次的顺序, 以减少分拣次数和分拣时行走的距离, 从而提高分拣的效率^[11]。文献[12]针对常规的人工分拣仓库订单分批问题, 以减少分拣批次路径时长为目标, 设计了一种混合元启发式算法。文献[13]针对订单分拣时的停滞和空闲现象, 以总订单完工时间最小化为目标, 提出一种启发式的种子算法来处理订单的分批与批次排序问题。文献[14]研究了使用AGV的无人仓库系统订单分批问题, 以提高订单分拣

效率和降低分拣成本为目标, 设计了一种了K-max聚类算法。在研究订单分批问题时, 通常要求一张订单不能拆分到多个批次中, 因为订单拆分之后需要进行额外的合并操作。

随着如今分拣设备的智能化, 订单的拆分与合并都较易实现, 学者们也开始研究订单拆分情况下的订单分拣优化问题。文献[15]以配送成本最小化为目标, 研究了基于订单拆分的车辆容量限制的配送路径规划问题。文献[16]研究了考虑订单拆分的订单分批与分拣路径的联合优化问题。文献[17]以最小化总延误时间为目标, 研究拆分策略下订单的分批以及批次的分配问题。订单可拆分时虽然可以使订单的分拣更加灵活高效, 但是额外的合并时间将导致订单包装的耗时增加, 订单包装时间的增加会影响整体分拣的效率^[18]。

本文研究来源于实际项目, 以国内某珠宝公司配送中心的智能仓库为研究对象, 研究自动小车分拣系统的优化问题。其中产品存放采用分散存储的方式^[19], 每件产品都有其所属的品项, 即SKU(stock keeping unit), 并有唯一的识别码。本文考虑智能仓库实际应用需求下的订单拆分策略, 研究了两类订单混合分拣并且部分订单可拆分的订单分拣问题, 并提出了改进离散灰狼优化算法(improved discrete grey wolf optimization, IDGWO)对问题进行求解。

1 问题描述与模型建立

1.1 问题描述

配送中心的订单主要分为两类: 一是门店补货用的普通订单, 其每个订单中产品的数量较少, 但订单数量占订单总量的绝大部分; 二是配送中心偶尔会收到新店开业或大型活动的订单, 其每个订单中产品的数量远大于普通订单, 但订单数量远小于普通订单, 此类订单需要人工处理, 后

文以人工订单代指。图 1 给出了 AVSS 系统的布局简图以及产品流向，订单分拣的主要工艺流程为“机械手+传送带+分拣 AGV+人工收集站或周转 AGV+自动包装机”。货架使用的是双面立体货架，且每个库位都只能存放一件产品，货架之间形成一条巷道，每条巷道间都配置有传送带和机械手用于产品下架，各巷道同时进行产品下架操作。传送带的末端设有缓存区可缓存一定量的产品，当缓存区的产品数量达到容量时，该巷道将会暂停下架操作。由于配送中心会收到两种不同的订单，故会分别采用不同的包装工艺。对于人工订单，分拣 AGV 会将产品运往人工收集站进行汇集，当人工收集站汇集了整张订单的产品时，包装人员就会对人工订单进行手工包装；对于普通订单，分拣 AGV 会将产品运往周转 AGV 处汇集，当周转 AGV 汇集了整张订单的产品后会将其运往自动包装机进行包装。在进行分拣时，订单中每件产品的 SKU 已知，但下架的库位未确定，需要从对应 SKU 的库位中选取，同时为了提高分拣效率需要对订单进行分批，并对批次进行排序。

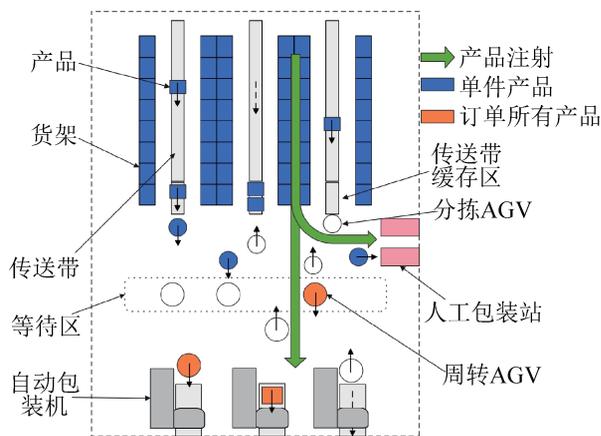


图 1 AVSS 系统的布局简图和产品流向
Fig. 1 AVSS layout and product flow

1.2 拆分策略

传统的订单分拣问题中，一般都采用订单不可拆分的原则，因为订单拆分后需要进行合并，

会附加额外的工作量。在 AVSS 系统进行订单分拣时，虽然两种订单的包装工艺互不影响，但是产品的分拣都是通过分拣 AGV 进行的。由于单张人工订单的产品数量远多于普通订单，而普通订单的总量又远多于人工订单。当订单不允许拆分时，若同一批次的订单中同时包含这两类订单，由于人工订单对于分拣 AGV 的需求量较大，同时人工收集站一次只能和一台分拣 AGV 交接产品，故人工收集站前可能会出现图 2 中分拣 AGV 堵塞的情况。由于分拣 AGV 的数量有限，一旦大量分拣 AGV 堵塞在人工收集站，则用于分拣普通订单的分拣 AGV 数量就会减少，从而影响普通订单的分拣，导致 AVSS 系统订单分拣的效率降低。并且当一个批次的订单中只有普通订单时，人工收集站处于闲置的状态，得不到充分的利用。

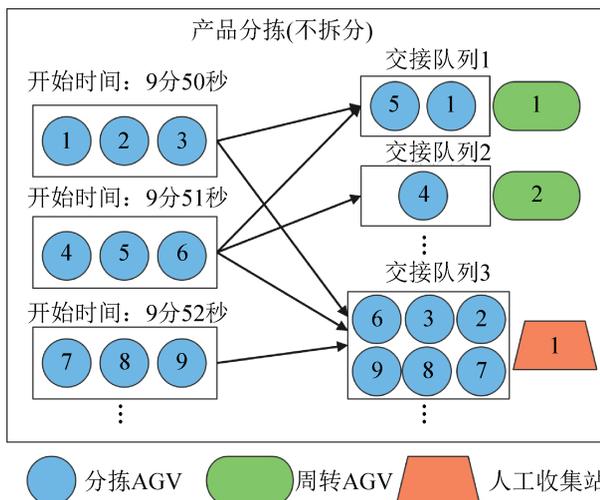


图 2 AVSS 系统人工订单不拆时的堵塞现象示意图
Fig. 2 Blockage phenomenon of AVSS without manual order splitting

为了解决 AVSS 系统中的堵塞现象，提出了一种订单拆分的策略，即将人工订单拆分成多个子订单，并分散在各个批次中进行分拣，从而减小各批次中人工订单的规模以及人工订单对分拣 AGV 的需求量，同时使人工收集站能在更多的批次中得以利用，从而缓解堵塞显现。由于分拣 AGV 的主要任务是将同一张订单中的产品汇集到一处，故人工订单的拆分与合并不会引入额外的

工作量。然而只有当整张人工订单的产品分拣完成之后,才能进行包装,因此对拆分后子订单所在批次的下架顺序有一定的限制,以保证分拣时人工订单的数量不会超过人工收集站的数量。

2 订单分拣问题数学建模

2.1 问题假设和变量

AVSS系统的订单分拣方案确定后,需经过产品下架、订单分拣以及订单包装3个阶段,并且通过多种设备来完成。其过程类似于柔性车间作业,但每个阶段的处理情况要更为复杂。为了简化问题并且结合系统的实际工艺,本文对AVSS系统的订单分拣问题做出如下假设:

(1) 订单和产品信息在分拣前已知,并且订单按照统一的数量进行分批;

(2) 配送中心的总库存可以满足所有订单的需求;

(3) 不考虑设备故障和订单变更等随机事件;

(4) 人工订单按照统一规格的数量进行拆分;

(5) 设备之间一对一的交接产品,且交接时间相同;

(6) AGV任务分配按照先完成先分配和就近原则;

(7) AGV的行驶距离为起点和终点的曼哈顿距离;

(8) 每一批订单产品的下架以传送带运输的方向为基准,从后往前,从左面货架到右面,从高处库位到低处依次将产品下架;

(9) 人工收集站收集完一整张人工订单的产品后,产品将被取走且人工收集站立即投入使用;

(10) 在自动包装机包装前一个订单时,自动包装机前可以有一台周转AGV停留等待;

(11) 当前批次的订单在分拣时,若可使用的周转AGV和人工收集站的数量足以安置下一批订单时,则下一批次的订单可接续在本批次后进行分拣。

为了建立数学模型,提前定义一些变量如下:

i 为订单, I 为订单集合, E 为订单总数, $i \in I = \{1, 2, \dots, E\}$; I^L 、 I^S 分别为拆分后人工订单的子订单集合以及普通订单集合, $I^L \cup I^S = I$, $I^L \cap I^S = \emptyset$; I_m^L 为人工订单 m 拆分的子订单集合, $I_m^L \subset I^L$, M 为人工订单总数, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$; g 为平均每件人工订单产品的包装时间; r 为人工收集站的数量; (i, j) 为订单 i 中的第 j 件产品, $(i, j) \in U$; J_i 为订单 i 中的产品数量; U 为所有订单中的产品集合; C_n 为批 n 中拆分的子订单所属的人工订单的数量, P 为批次总数, $n \in N = \{1, 2, \dots, P\}$; f 为分拣AGV, F 为分拣AGV总数, $f \in \{1, 2, \dots, F\}$; z 为周转AGV, Z 为周转AGV总数, $z \in \{1, 2, \dots, Z\}$; h 为自动包装机; H 为自动包装机总数; $h \in \{1, 2, \dots, H\}$; l 为下架库位, L 为库位集合, Q 为库位总数, $l \in L = \{1, 2, \dots, Q\}$; L_{ij} 为产品 (i, j) 的SKU对应的库位子集, $L_{ij} \subset L$ 。

同时定义如下决策变量:

x_{ijl} 为0-1变量,若产品 (i, j) 从库位 l 下架则为1,否则为0; u_{in} 为0-1变量,若订单 i 分配到批次 n 则为1,否则为0; $y_{n'n}$ 为0-1变量,若批次 n' 先于批次 n 分拣则为1,否则为0。

为了便于描述批次顺序,引入符号**begin**和**end**分别表示第一个批次之前和最后一个批次之后。

2.2 分拣时间计算

2.2.1 产品下架时间

分拣开始时,各巷道第一件产品的下架开始时刻 $T_{ij}^C = 0$ 。在传送带缓存区未满载时,各巷道产品的下架开始时刻为前一件产品 (i', j') 完成下架的时刻,表示为

$$T_{ij}^C = T_{i'j'}^C + a_{i'j'}$$

式中: T_{ij}^C 为当前产品 (i, j) 的下架开始时刻; $T_{i'j'}^C$ 为前一件产品 (i', j') 的下架开始时刻; $a_{i'j'}$ 为产品 (i', j') 的机械手下架操作时间,与产品 (i', j') 下架库位的位置有关。

若产品下架前传送带缓存已满,则产品的下

架开始时刻为

$$T_{ij}^C = T_{f''j''}^S$$

式中： $T_{f''j''}^S$ 为缓存区内第一件产品(i'',j'')被分拣 AGV 分拣的时刻。

若巷道当前批次的产品已下架完毕，而下一个批次的产品还未开始下架，则下一个批次的产品开始下架的时刻为下一个批次可以分拣的时刻 T_n^N ，表示为

$$T_{ij}^C = u_{in} T_n^N$$

2.2.2 产品分拣时间

分拣开始时，若产品(i,j)抵达传送带末端时，分拣 AGV 也已抵达并在等待产品，则产品(i,j)的分拣开始时刻为

$$T_{ij}^S = T_{ij}^C + a_{ij} + b_{ij} + e$$

式中： T_{ij}^S 为分拣 AGV 开始分拣产品(i,j)的时刻； a_{ij} 为产品(i,j)的机械手下架操作时间； b_{ij} 为传送带运输产品(i,j)的时间，与产品(i,j)下架库位的位置有关； e 为设备交接产品的时间。

若产品(i,j)抵达传送带末端时，分拣 AGV 未抵达，则产品(i,j)的分拣开始时刻为

$$T_{ij}^S = T_{f'j'}^F + s_f + e$$

式中： $T_{f'j'}^F$ 为分拣 AGV 的上一件产品(i',j')分拣完成的时刻； s_f 为分拣 AGV 返回传送带末端的时间，为起点和终点的曼哈顿距离与分拣 AGV 速度的比值。

分拣 AGV 抵达周转 AGV 或人工收集站时，若已有其他的分拣 AGV 预先抵达，则在产品交接时需要按顺序交接，分拣 AGV 分拣完成时刻为

$$T_{ij}^F = \max \{ T_{f'j'}^S + c_f, T_{f'j'}^F \} + e$$

式中： T_{ij}^F 为分拣 AGV 完成产品(i,j)分拣的时刻； c_f 为分拣 AGV 前往周转 AGV 或人工收集站的时间，为起点和终点的曼哈顿距离与分拣 AGV 速度的比值； $T_{f'j'}^F$ 为当前周转 AGV 或人工包装前一件产品(i',j')分拣完成的时刻。

同时，在普通订单 $i \in I^S$ 的第一件产品分拣时，其分拣完成的时刻需满足：

$$T_{ij}^F \geq T_{hi''}^H + s_z$$

式中： $T_{hi''}^H$ 为周转 AGV 将上一个订单 i'' 交接给自动包装机包装并开始返回等待区的时刻； s_z 为周转 AGV 返回等待区的时间。

若产品(i''',j''')为人工订单 m 最后一件分拣完成的产品时，则人工订单 m 开始包装，包装完成时刻为

$$T_m^R = T_{f'''j'''}^F + t + g \sum_{i \in I_m^L} J_i$$

式中： $T_{f'''j'''}^F$ 为人工订单 m 最后一件产品(i''',j''')分拣完成的时刻， $i''' \in I_m^L$ ； t 为人工订单转移到包装点的平均转移时间； $g \sum_{i \in I_m^L} J_i$ 为人工订单 m 包装时间。

2.2.3 订单包装时间

当周转 AGV 汇集完一张普通订单的产品后，若要前往的自动包装机前没有其他周转 AGV，则周转 AGV 开始运输产品，否则等到其他周转 AGV 交接完产品并离开后再开始运输，周转 AGV 开始运输订单 $i \in I^S$ 的产品的时刻为

$$T_{zi}^Z = \max \{ T_{fj'}^F, T_{hi'}^H \}$$

式中： $T_{fj'}^F$ 为普通订单 i 最后一件产品(i,j')分拣完成的时刻； $T_{hi'}^H$ 为自动包装机开始包装前一个订单 i' 的产品时刻。

自动包装机前一个订单包装完成后才能包装下一个订单，自动包装机开始包装订单 $i \in I^S$ 的时刻，同时也是周转 AGV 开始返回的时刻：

$$T_{hi}^H = \max \{ T_{zi}^Z + c_z, T_{hi'}^F \} + e$$

式中： c_z 为周转 AGV 前往自动包装机的时间，为起点和终点的曼哈顿距离与周转 AGV 速度的比值； $T_{hi'}^F$ 为自动包装机前一个订单 i' 包装完成的时刻。

订单 $i \in I^S$ 包装完成时刻为

$$T_{hi}^F = T_{hi}^H + p_i$$

式中： p_i 为订单 $i \in I^S$ 的包装时间。

当人工订单的子订单 $i \in I^L$ 最后一件产品(i,j')分拣完成时，若当前批次分拣时第 1 次满足以下 2

个条件: ①可使用的周转AGV数量大于等于下一批次的普通订单总数; ②下一批次可使用的人工收集站的数量, 即同一张人工订单拆分的子订单可使用同一个人工收集站, 新的人工订单的子订单需要未使用的人工收集站, 大于等于下一批次的人工订单数。则下一批次订单可以分拣的时刻 T_n^N 就为产品 (i, j') 分拣完成的时刻:

$$T_n^N = u_{in} y_{n'n} T_{ji'}^F$$

同样的, 当普通订单 $i \in I^S$ 开始包装时, 若当前批次第一次满足上述两个条件, 则下一批次订单可以分拣的时刻 T_n^N 就为订单 i 开始包装的时刻 T_{hi}^H :

$$T_n^N = u_{in} y_{n'n} T_{hi}^H$$

若当前批次的产品都已分拣完时, 上述条件仍然无法得到满足, 则说明当前的分拣方案不可行, 通过将目标函数设为惩罚值来进行淘汰。

2.3 模型建立

本文以订单总完工时间最小化为目标, 通过上述分拣时间计算公式可计算出目标函数的值, 建立部分订单可拆的AVSS系统订单分拣数学模型为

$$\text{Minimize max} \begin{cases} \max \{T_{hi}^F | i \in I^S\} \\ \max \{T_m^R | m \in \{1, 2, \dots, M\}\} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{l=1}^Q x_{ijl} = \sum_{l \in L_{ij}} x_{ijl} = 1, \forall (i, j) \in U \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^E \sum_{j=1}^{J_i} x_{ijl} \leq 1, \forall l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^P u_{in} = 1, \forall i \in I \quad (4)$$

$$y_{nm} = 0, \forall n \in N \quad (5)$$

$$\sum_{n \in N+\text{begin}} y_{n'n} = 1, \forall n' \in N+\text{begin} \quad (6)$$

$$\sum_{n' \in N+\text{begin}} y_{n'n} = 1, \forall n \in N+\text{end} \quad (7)$$

$$C_n \leq r, \forall n \in N \quad (8)$$

目标函数(1)表示最小化总订单完工时间, 即最后一张普通订单和人工订单包装完成时刻的较

大值; 约束(2)表示每一件产品只能从一个库位下架, 并且是产品对应SKU的库位; 约束(3)表示每个库位最多只能下架一件产品; 约束(4)表示每张订单只能分配到一个批次中; 约束(5)表示批次自身不存在前后顺序; 约束(6)表示紧排在每个批次之后的只有一个批次; 约束(7)表示紧排在每个批次之前的只有一个批次; 约束(8)表示任意批次中拆分的子订单所属的人工订单的数量不能超过人工收集站的数量。

3 模型的求解算法

本文中的订单分拣问题由3个子问题组成: 订单分批、批次排序、产品下架库位的选取。其中订单分批被证明为NP-hard问题^[20]; 批次排序问题可以归结为旅行商问题; 下架库位的选取问题可以抽象为带约束的背包客问题, 以上问题均为NP-hard问题。对于小规模的问题可以通过求解器来求解, 然而配送中心的订单规模通常较大, 通过求解器求解耗时过长, 无法满足实际的使用需求。灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO)^[21]具有参数少, 易实现, 易收敛等特点, 在优化领域得到广泛的应用^[22-23]。本文针对订单分拣问题, 设计了一种基于交叉的改进离散灰狼优化算法, 通过追踪模式和搜索模式的交替搜索, 使算法在可接受的时间内能得到较好的近似最优解。

3.1 问题编码

本文使用三个向量分别对订单分批、批次排序和下架库位选取进行编码, 如图3所示。订单批次向量的每个值表示对应订单的批次; 批次排序向量的每个值表示对应批次的下架顺序; 库位选取向量的长度为订单中的产品总数, 按照SKU划分为多个小段, 每个小段的长度为该SKU总的需求量。每个SKU的所有库位都进行了编号, 库位选取向量的每个值表示该SKU在订单列表中出现时所选择的库位编号。为了使AVSS系统在分拣时全负荷运行, 将第一个批次的订单数量设为

周转 AGV 的数量，后续的订单再按照设定的数量等量分批，剩余不足量的订单组成最后一个批次，故批次排序向量中的第一个和最后一个值固定为 1 和批次总数 P 。

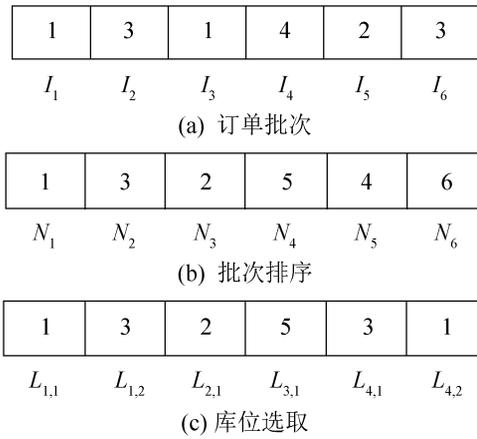


图3 编码示意图
Fig. 3 Coding

3.2 子订单批次调整

由于人工收集站只有收集完所有人工订单子订单的产品后，才能用于其他人工订单的产品收集，且与相邻批次的下架有一段重叠的时间。因此需要对子订单的批次进行调整，使连续的几个批次中最多只能包含人工收集站数量的人工订单及其全部子订单，同时相邻两个批次不同人工订单的子订单数量不能超过人工收集站数量。 $r=3$ 时，子订单的调整如图 4 所示，通过以下 2 种操作进行：①将需要调整批次的子订单与最后一个符合条件的子订单对调批次；②将需要调整批次的子订单与目标批次中随机的普通订单对调批次。

3.3 改进离散灰狼优化算法

在标准的 GWO 算法中，种群中的个体根据决策层个体的位置信息进行自我位置的更新，使算法具有较强的全局粗搜索能力，但局部精细搜索能力较弱。本文设计的追踪模式和搜索模式交替的搜索机制为：在每次迭代过程中，先采用追踪模式进行全局搜索，然后采用搜索模式加强局部搜索的能力。

3.3.1 追踪模式

灰狼优化算法的实质在于个体根据自己和决策层的位置信息不断调整自身的位置，从而逼近猎物的位置。个体新位置是自己同 α , β , δ 个体相互作用的结果。原始 GWO 适用于求解连续型问题，不能直接用于订单分拣问题的求解。本文个体位置更新公式为

$$X_k(t+1) = \begin{cases} cross(X_k(t), X_\alpha(t)), & rand \leq \frac{1}{3} \\ cross(X_k(t), X_\beta(t)), & \frac{1}{3} < rand \leq \frac{2}{3} \\ cross(X_k(t), X_\delta(t)), & rand > \frac{2}{3} \end{cases} \quad (9)$$

式中： X_k 为个体 k 的位置向量； X_α , X_β , X_δ 分别为决策层 α , β , δ 个体的位置向量； t 为当前迭代次数； $rand$ 为区间 $[0,1]$ 上的随机数， $cross(P_1, P_2)$ 表示交叉操作。

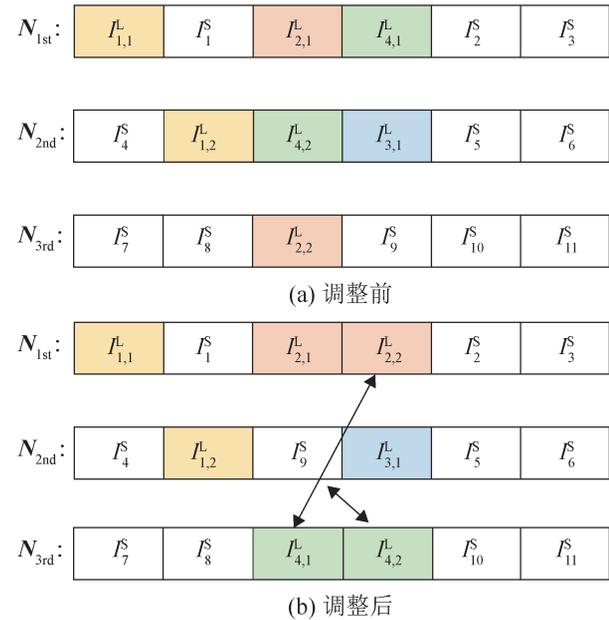


图4 子订单批次调整示意图
Fig. 4 Sub-order batch adjustment

根据本文问题的特点，针对 3 个子问题设计了以下 3 种交叉方式，使交叉后的个体保留交叉双方的信息特征，如图 5 所示，其中 F 表示交叉后的位置向量。

(1) 随机将 P_1 的订单批次向量中 50% 的批次拷

贝给 F , 剩下的批次从 P_2 中拷贝, 交叉后需要根据各批次订单的数量进行调整, 随机将超出批次数量的订单补充到其他订单数量不足的批次, 然后进行子订单的批次调整。

(2) 将 P_1 和 P_2 同一位置上相同的值拷贝给 F , 随机生成交叉区间, 将 P_1 交叉区间上的值拷贝给 F , 再从 P_2 中删去 F 中已有的值, 最后将 P_2 剩余的值依次拷贝入 F 中。

(3) 随机将 P_1 的库位选取向量中 50% 的 SKU 的库位拷贝给 F , 剩下的库位从 P_2 中拷贝。

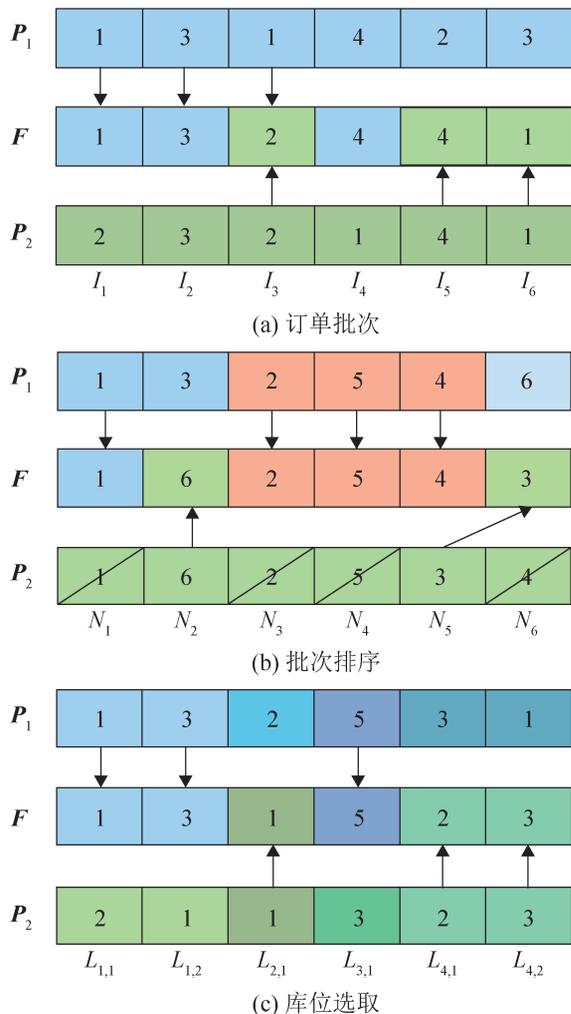


图5 cross 交叉操作示意图
Fig. 5 cross operation

3.3.2 搜索模式

在搜索模式下, 种群需要对猎物的位置进行更精细的搜索。其主要思想是重复对搜索个体位

置向量进行邻域搜索, 当搜索后的位置更接近猎物时, 则用搜索后的位置向量替代当前个体的位置向量。由于决策层个体在搜索最优值时起到决定性的作用, 因此只对 α , β , δ 个体进行搜索模式的操作。根据本文问题的特点, 在保证搜索操作前后的个体只存在较小差异性的情况下, 设计了以下3种邻域结构:

- (1) 随机交换两个批次中 50% 的订单。
- (2) 随机交换两个批次的下架顺序。
- (3) 随机选择 5% 的 SKU, 重新对其下架库位进行选择。

每次重复进行邻域搜索时, 随机执行其中一种邻域结构。由于算法在运行初期主要侧重于全局搜索, 而在迭代后期局部搜索的重要性才增加, 故邻域搜索的次数调节公式为

$$c = [c_{\max} \cdot t / iter_{\max}]$$

式中: c_{\max} 为最大重复次数; $iter_{\max}$ 为最大迭代次数; $[\]$ 为取整运算。

3.4 算法步骤

基于上述设计, IDGWO 的流程如下:

步骤1: 设置算法参数, 包括种群规模、最大迭代次数和搜索模式的最大重复次数。

步骤2: 种群初始化, 即按照 3.1 节的编码方式对种群中的个体随机进行初始化。

步骤3: 按照 3.2 节的方法调整种群子订单的批次, 计算每个个体的适应度, 并确定决策层个体 α , β , δ 。

步骤4: 若达到算法终止条件则执行步骤8, 否则执行步骤5。

步骤5: 根据式(9), 对种群中的每个个体执行追踪模式的操作。

步骤6: 调整种群子订单的批次, 计算种群适应度, 并更新决策层个体。

步骤7: 对决策层个体执行搜索模式的操作, 执行完后跳转步骤4。

步骤8: 算法结束, 输出结果。

4 数值实验与分析

在对比实验中，将人工订单拆分和不分情形下 IDGWO 的结果进行对比，同时对比人工订单拆分情形下 IDGWO 与标准遗传算法 (genetic algorithm, GA)、智能果蝇优化算法 (smart fruit-fly optimization algorithm, SFOA)^[17]、GWO 的优化效果。其中，IDGWO 的种群大小设为 80，最大迭代次数 10， c_{max} 设为 30；GWO 的种群大小和迭代次数同 IDGWO，由于原始的 GWO 不适用于离散问题的求解，故采用式 (9) 来进行个体位置的更新；GA 算法的种群大小为 80，最大迭代次数 10，交叉率为 0.8，变异率为 0.1；SFOA 算法的种群大小设置为 10，子种群的大小为 8，知识库更新率为 0.1，精英果蝇数量为 20，最大迭代次数为 10。算法运行统一使用安装了 Matlab 2020a 并配置有 Intel Core i7-7700 3.6 GHz CPU 8 GB RAM 的 PC。

4.1 数值算例与参数

AVSS 系统布局使用实际的布局参数，双面货架的每一面都有 40×60 个储位，其他的设备参数如表 1 所示。为了使仿真数据更贴合实际中的情况，以该公司某一时期库存中的各种数量 SKU 的占比情况来生成库存数据。自动包装机的包装时间使用实际的包装时间，由于自动包装机实际可包装的最大产品数量不能超过 20，该公司的 WMS 系统会提前将普通订单的产品数量调整为不多于 20 件，因此算例中普通订单的产品数量不超 20。本文共设计了 6 个数值算例，算例参数如表 2 所示，其中人工订单的产品数量范围为 [200,400]。每个实验结果取 5 次独立重复实验的平均值。

由于除第一个批次以外，其余批次中的订单数量需要提前设定，而各批次的订单数量对分拣的效率有着直接的影响。图 6 展示了 6 个数值算例中，等量分批的订单数量与总完工时间的变化曲线，其中等量分批的订单数量为 25 时，6 个算例的总完工时间都在最小值附近。由于在实际运行中，AVSS 系统的布局和设备的使用情况变化不

大，故参考图 6 中的结果可将等量分批的订单数量设为 25。

表 1 AVSS 系统设备参数
Table 1 AVSS device parameters

参数	数值
巷道(条)	40
货架长/m	7.9
货架高/m	2.8
传送带缓存区存量(件)	3
周转 AGV 数量(台)	100
分拣 AGV 数量(台)	100
传送带速度/(m/s)	1
周转 AGV 速度/(m/s)	1.5
分拣 AGV 速度/(m/s)	1.5
自动包装机(个)	14
人工收集站(个)	3
产品交接时间/s	5
机械手下架操作时间/s	10~18
每张子订单包含的产品数量(个)	20
人工订单转移时间/s	30
平均每件人工订单产品的包装时间/s	1.2

表 2 算例参数
Table 2 Example parameter

算例	订单数量	总产品数量	SKU 数量	人工订单数量	人工订单产品数量
1	500	6 000	2 300	2	645
2	500	8 000	3 000	4	1 206
3	1 000	11 000	5 000	4	1 237
4	1 000	15 000	6 000	6	1 933
5	1 500	18 000	7 000	8	2 310
6	1 500	20 000	7 000	10	3 092

4.2 对比实验

基于表 2 的算例进行对比实验，令 t 为总订单完工时间， t_1 为算法运行时间，对比指标 $p = (t_{对比算法} - t_{IDGWO}) / t_{对比算法}$ 为所提出的算法相较于其他算法总订单完工时间的改善程度。

表 3 展示了 IDGWO 算法下，人工订单拆分与不拆的比较结果， p_1 为人工订单拆分相较于不拆时的情况总订单完工时间的改善程度。由表 3 可知，在 6 个算例中相较于未采用拆分策略的情形，拆分策略显著降低了总订单完工时间，改善范围为 12.14%~28.64%。

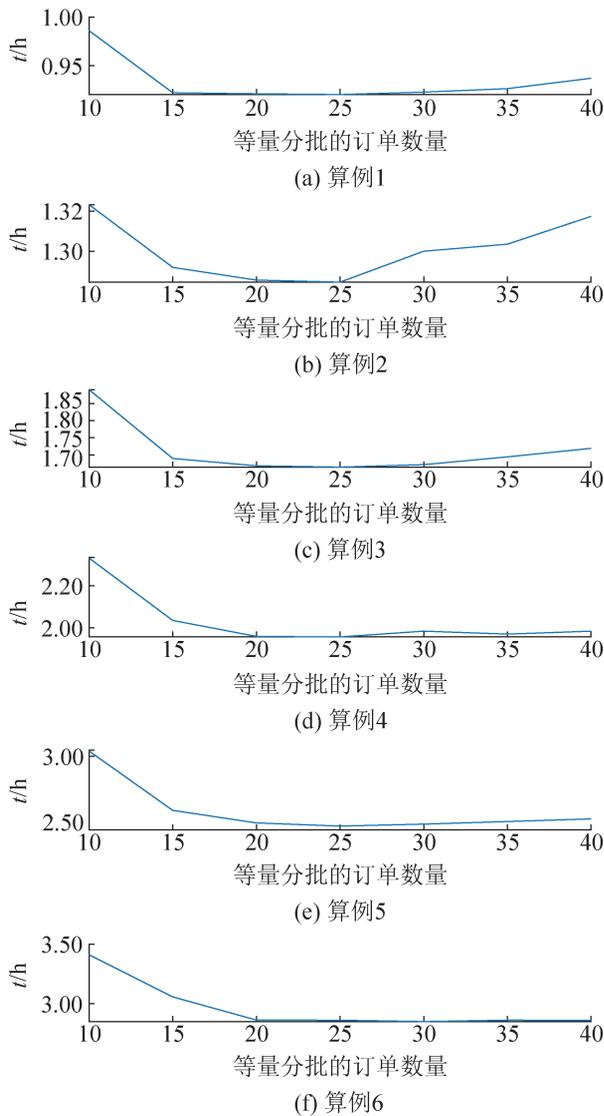


图 6 总完工时间随等量分批订单数量的变化曲线
Fig. 6 Curve of total completion time with the number of orders in equal batches

拆分策略下 IDGWO 与其他算法的比较结果如表 4 所示, 其中 p_2 、 p_3 、 p_4 分别为 IDGWO 与

GA、SFOA 和 GWO 的计算结果比较。由表 4 的对比结果可知, 在 6 个算例中, IDGWO 的计算时间最长, 但所得的订单总完工时间在所有算法中是最短的, 其中较 GA 减少了 8.91%~26.44%, 较 SFOA 减少了 0.75%~2.69%, 较 GWO 减少了 7.72%~26.16%。

表 3 人工订单拆分与不拆的对比结果
Table 3 Comparison result of manual orders with and without splitting

算例	IDGWO(不拆)		IDGWO		$p_1/\%$
	t/h	t_1/min	t/h	t_1/min	
1	1.228	4.20	0.920	4.36	25.08
2	1.450	4.40	1.274	5.57	12.14
3	2.162	7.01	1.666	8.14	22.94
4	2.640	9.24	1.951	10.95	26.10
5	3.513	12.07	2.529	14.72	28.01
6	3.984	18.49	2.843	15.98	28.64

为了更直观的观察人工订单拆分与不拆对分拣过程的影响, 对某次算例 1 在 IDGWO 算法下拆分和不拆的实验数据进行处理, 得到订单的分拣过程和包装过程的甘特图, 如图 7, 8 所示, 其中分拣时的甘特图每个方块表示一个订单从第一件产品分拣完成到最后一件产品分拣完成的耗时, 包装时的甘特图每个方块表示一个订单从包装开始到包装完成的耗时。图 7(a)和图 8(a)中, 1~100 为周转 AGV, 100 之上的为人工收集站, 100 以上相同颜色的订单为来自同一个人工订单的子订单。图 7(b)和图 8(b)中, 1~14 为周转 AGV, 14 之上的为人工收集站。

表 4 算法对比结果
Table 4 Algorithm comparison

算例	GA		SFOA		GWO		IDGWO		$p_2/\%$	$p_3/\%$	$p_4/\%$
	t/h	t_1/min	t/h	t_1/min	t/h	t_1/min	t/h	t_1/min			
1	1.010	2.42	0.936	2.63	0.997	2.28	0.920	4.36	8.91	1.71	7.72
2	1.622	3.49	1.301	3.27	1.629	3.07	1.274	5.57	21.46	2.08	21.79
3	1.861	4.56	1.679	5.14	1.829	3.86	1.666	8.14	10.48	0.77	8.91
4	2.531	8.61	2.005	6.69	2.515	5.70	1.951	10.95	22.92	2.69	22.43
5	3.073	11.91	2.548	9.08	3.079	7.35	2.529	14.72	17.70	0.75	17.86
6	3.865	10.13	2.885	10.08	3.850	8.80	2.843	15.98	26.44	1.46	26.16

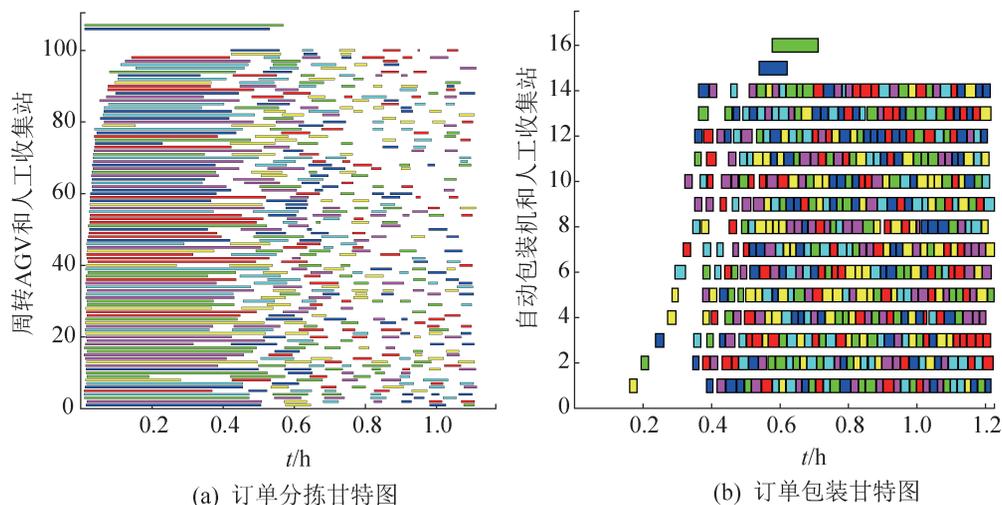


图 7 人工订单不拆时的甘特图
Fig. 7 Gantt chart for manual orders without splitting

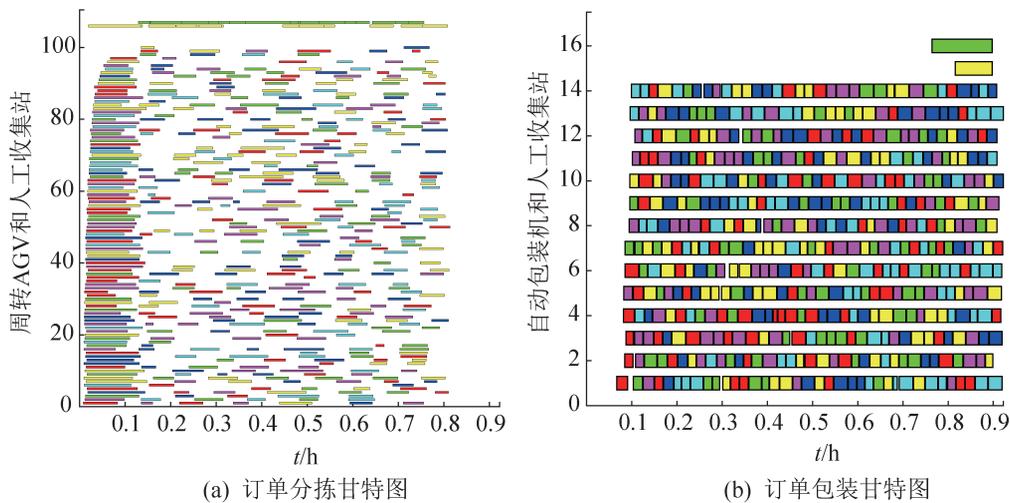


图 8 人工订单拆分时的甘特图
Fig. 8 Gantt chart for manual orders with splitting

由图 7 可以看出，在人工订单不拆的情形下，人工收集站分拣后期出现较多的空闲，对比图 8 当人工订单在进行分拣时，普通订单的分拣时间显著增加，普通订单的包装出现了较大间隙。由图 8 可以看出，在人工订单拆分的情形下，人工收集站的空闲时间较少，普通订单的分拣和包装受到的影响较小。

为了观察订单拆分策略对堵塞现象的缓解效果，对算例 1~6 的某次实验结果进行处理，得到当人工订单的产品在分拣时，分拣 AGV 的使用情况。对人工订单的产品在离开缓存区和被交接给

人工收集站的时刻，去往人工收集站的分拣 AGV 的数量进行统计得到图 9。

由图 9 可知，在人工订单不拆的情形下，人工订单的产品在分拣时，对分拣 AGV 的占用量在大部分算例中达到 60% 以上，说明人工收集站前出现了堵塞现象，使得分拣普通订单的分拣 AGV 数量减少。而在人工订单拆分的情况下，人工订单的产品在分拣时，对分拣 AGV 的占用量在大部分算例中少于 30%，说明拆分策略有效缓解了堵塞现象，使得更多的分拣 AGV 能去完成普通订单的分拣，从而使 AVSS 系统的分拣效率得到提升。

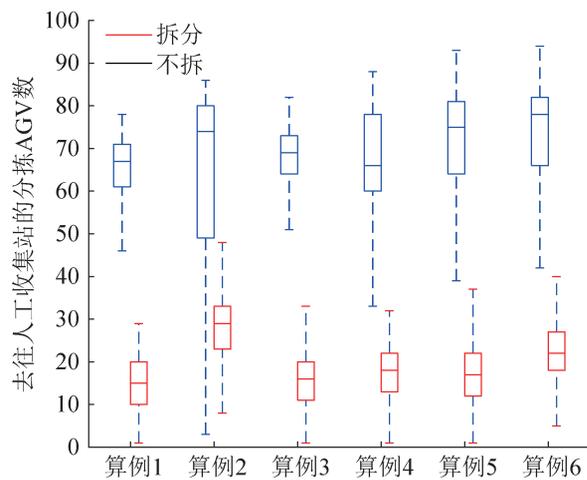


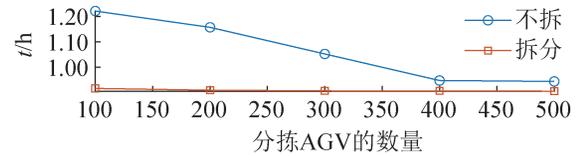
图9 人工订单产品分拣时的分拣AGV使用情况

Fig. 9 Use of AGVs in sorting products of manual orders

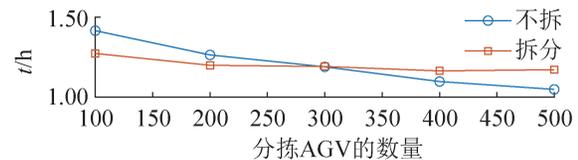
4.3 拆分策略的必要性分析

通过对比实验可知, 当人工订单不进行拆分时, 分拣AGV的堵塞现象会严重影响分拣的效率, 主要原因是堵塞使得分拣普通订单的分拣AGV数量减少。故通过增加分拣AGV的数量同样可以提高分拣时的效率。为了探究拆分策略的必要性, 测试算例1~6中, 分拣AGV的数量由100变化到500时, 人工订单拆分与不拆时的总订单完工时间的变化, 如图10所示。由图10可以看出, 除了算例2, 在其他算例中, 随着分拣AGV数量的增加, 不拆时的总订单完工时间显著减少, 而拆分的总订单完工时间变化不大, 拆分与不拆时的总订单完工时间越来越接近, 但拆分的总订单完工时间仍然更短。说明大多数情况下, 拆分策略的对缓解堵塞的效果比增加分拣AGV策略的效果更好。在算例2中, 拆分时的总订单完工时间同样显著减少, 并且不拆的总订单完工时间变化不大。在分拣AGV数量超过300辆之前, 拆分时的总订单完工时间更短, 但当分拣AGV数量超过300后, 不拆时的总订单完工时间更短。说明分拣AGV增加到一定程度后可以达到更好的缓解堵塞的效果。但由于实际情况中成本和场地的限制, 分拣AGV的数量是有限的, 并且配送中心接到的订单中, 普通订单通常情况下超过1000张,

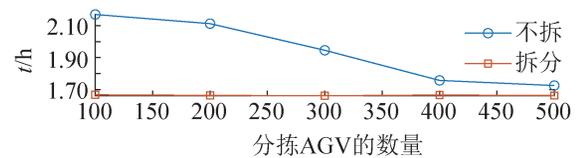
而人工订单一般不多于5张, 故拆分策略对于AVSS系统堵塞现象的缓解以及分拣效率的提升是必要的。



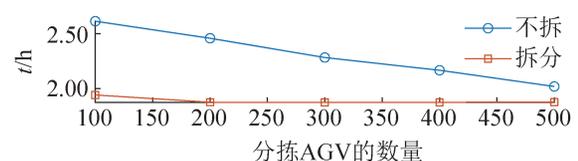
(a) 算例1



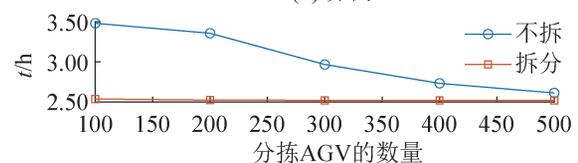
(b) 算例2



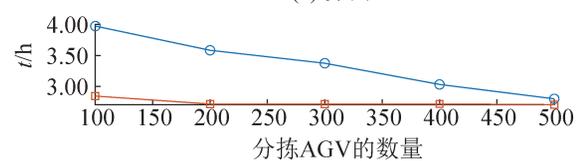
(c) 算例3



(d) 算例4



(e) 算例5



(f) 算例6

图10 总完工时间随分拣AGV数量的变化曲线

Fig. 10 Curve of total completion time with the number of AGVs

5 结论

本文以某公司实际配送中心的自动小车分拣系统为研究对象, 研究了在两类订单混合分拣的情况下, 订单拆分策略对订单分拣效率的影响。研究以总订单完工时间最小化为目标, 建立了订

单拆分下的订单分拣问题的整数规划模型，并将问题划分成订单分批、批次排序以及下架库位选取 3 个子问题。然后提出了改进离散灰狼优化算法对 3 个子问题进行联合优化。最后通过对比实验，验证了订单拆分策略和所提算法的有效性，并进一步分析了拆分策略的必要性，为自动小车分拣系统的实际运用提供了参考。

本文的研究仍存在一定的局限性。首先本文对 AGV 的行驶做了简化处理，以曼哈顿距离作为 AGV 的行驶距离，而实际运用中多 AGV 的运行情景较为复杂，使得计算的结果与实际情况存在一定的误差，后续应该尽可能的还原真实的分拣场景。其次本研究是基于离线的订单分拣优化，未考虑订单取消、紧急订单以及设备故障等随机事故。未来的研究可以针对存在订单取消、紧急订单以及设备故障等场景下的订单分拣问题，实现在线的优化。

参考文献:

- [1] Nils Boysen, René de Koster, Felix Weidinger. Warehousing in the E-commerce Era: A Survey[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 277(2): 396-411.
- [2] Sven Winkelhaus, Eric H Grosse. Logistics 4.0: A Systematic Review Towards a New Logistics System[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(1): 18-43.
- [3] Teun van Gils, Katrien Ramaekers, An Caris, et al. Designing Efficient Order Picking Systems by Combining Planning Problems: State-of-the-art Classification and Review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 267(1): 1-15.
- [4] Sven Winkelhaus, Zhang Minqi, Eric H Grosse, et al. Hybrid Order Picking: A Simulation Model of a Joint Manual and Autonomous Order Picking System[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 167: 107981.
- [5] 廉胤东, 谢巍. 基于视觉引导多 AGV 系统的改进 A* 路径规划算法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 1881-1890.
Lian Yindong, Xie Wei. Improved A* Path Planning Algorithm for Vision-Guided Multi-AGV System[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(8): 1881-1890.
- [6] Liu Yubang, Ji Shouwen, Su Zengrong, et al. Multi-objective AGV Scheduling in an Automatic Sorting System of an Unmanned (Intelligent) Warehouse by Using Two Adaptive Genetic Algorithms and a Multi-adaptive Genetic Algorithm[J]. *PloS one*, 2019, 14(12): e0226161.
- [7] He Xueting, Quan Hao, Lin Wanlong, et al. AGV Scheduling Optimization for Medical Waste Sorting System[J]. *Scientific Programming*, 2021, 2021: 4313749.
- [8] 张镜辉. 图书馆 AGV 智能分拣系统构成分析与规划设计-以汕头市图书馆为例[J]. *图书馆学研究*, 2021(4): 23-28.
Zhang Jinghui. Composition Analysis and Planning Design of Library AGV Intelligent Sorting System-A Case Study of Shantou Library[J]. *Researches on Library Science*, 2021(4): 23-28.
- [9] Zou Wenqiang, Pan Quanke, Wang Ling, et al. Efficient Multiobjective Optimization for an AGV Energy-efficient Scheduling Problem with Release Time[J]. *Knowledge-based Systems*, 2022, 242: 108334.
- [10] 余娜娜, 李铁克, 王柏琳, 等. 自动化分拣仓库中多 AGV 调度与路径规划算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(1): 171-180.
Yu Nana, Li Tieke, Wang Bailin, et al. Multi-AGVs Scheduling and Path Planning Algorithm in Automated Sorting Warehouse[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(1): 171-180.
- [11] Gibson D R, Sharp G P. Order Batching Procedures[J]. *European Journal of Operational Research*, 1992, 58(1): 57-67.
- [12] 吴仁超, 贺建军, 李欣, 等. 基于混合元启发式算法的订单分批问题[J]. *控制与决策*, 2022, 37(8): 2110-2118.
Wu Renchao, He Jianjun, Li Xin, et al. Hybrid Metaheuristic Algorithm for Order Batching Problem[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(8): 2110-2118.
- [13] Jiang Xiaowei, Sun Lijun, Zhang Yuankai, et al. Order Batching and Sequencing for Minimising the Total Order Completion Time in Pick-and-sort Warehouses[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 187: 115943.
- [14] 李珍萍, 田宇璇, 卜晓奇, 等. 无人仓系统订单分批问题及 K-max 聚类算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(5): 1506-1517.
Li Zhenping, Tian Yuxuan, Bu Xiaoqi, et al. Order Batching Problem of Unmanned Warehouse System and K-max Clustering Algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(5): 1506-1517.
- [15] 潘晓, 鹿冬娜, 王书海. 基于订单拆分的容量限制商超配送路径规划[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2022(5): 147-164.
Pan Xiao, Lu Dongna, Wang Shuhai. Capacitated Route

- Planning for Supermarket Distribution Based on Order Splitting[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2022(5): 147-164.
- [16] Olivier Briant, Hadrien Cambazard, Diego Cattaruzza, et al. An Efficient and General Approach for the Joint Order Batching and Picker Routing Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 285(2): 497-512.
- [17] 万明重, 蒋忠中, 秦绪伟, 等. 考虑拆分策略的智能仓库订单分拣优化问题[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1809-1819.
- Wan Mingzhong, Jiang Zhongzhong, Qin Xuwei, et al. Optimization for Order Picking Problem with Splitting Policy in Smart Warehouses[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(6): 1809-1819.
- [18] Zhong Shuya, Giannikas V, Merino J, et al. Evaluating the Benefits of Picking and Packing Planning Integration in E-commerce Warehouses[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 301(1): 67-81.
- [19] Felix Weidinger, Nils Boysen. Scattered Storage: How to Distribute Stock Keeping Units All Around a Mixed-shelves Warehouse[J]. Transportation Science, 2018, 52(6): 1412-1427.
- [20] Noud Gademann, Van de Steef Velde. Order Batching to Minimize Total Travel Time in a Parallel-aisle Warehouse [J]. IIE Transactions, 2005, 37(1): 63-75.
- [21] Mirjalili S, Seyed Mohammad Mirjalili, Lewis A. Grey Wolf Optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [22] 李维刚, 李阳, 赵云涛, 等. 基于改进灰狼算法的粒子滤波算法研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(1): 37-45.
- Li Weigang, Li Yang, Zhao Yuntao, et al. Research on Particle Filter Algorithm Based on Improved Grey Wolf Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(1): 37-45.
- [23] 顾九春, 姜天华, 朱惠琦. 多目标离散灰狼优化算法求解作业车间节能调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(8): 2295-2306.
- Gu Jiuchun, Jiang Tianhua, Zhu Huiqi. Energy-Saving Job Shop Scheduling Problem with Multi-objective Discrete Grey Wolf Optimization Algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(8): 2295-2306.