

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2025.03.011

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:孙军艳,王子豪,闫春妍,孙佳豪,贺高科.基于订单拆分策略的AGV货到人拣选系统订单分批优化[J].西安理工大学学报,2025,41(3):410-417.

SUN Junyan, WANG Zihao, YAN Chunyan, SUN Jiahao, HE Gaoke. Order batching optimization of AGV delivery to person picking system based on order splitting strategy[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2025, 41(3): 410-417.

基于订单拆分策略的 AGV 货到人拣选 系统订单分批优化

孙军艳, 王子豪, 闫春妍, 孙佳豪, 贺高科

(陕西科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 针对传统 AGV 货到人拣选系统路径重复、效率低下的问题,提出了一种订单可拆分策略的订单分批方法。本方法的优化目标为:AGV 行驶时间和拣货时间的总时间最小化。首先建立订单可拆分策略的订单分批数学模型,其次设计了一种基于 k 均值聚类的双层遗传算法(KC-DL-GA)求解模型,该算法可解决传统遗传算法初代群体质量低和收敛速度慢的问题。结果表明本文提出的订单可拆分策略的订单分批方法与随机分批策略、订单不可拆分的分批策略相比,拣货效率明显增加,KC-DL-GA 算法相较于双层 GA 算法收敛速度更快,稳定性更强。

关键词: 订单分批; 遗传算法; 订单拆分; 聚类算法

中图分类号: U653.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2025)03-0410-08

Order batching optimization of AGV delivery to person picking system based on order splitting strategy

SUN Junyan, WANG Zihao, YAN Chunyan, SUN Jiahao, HE Gaoke

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology,
Xi'an 710021, China)

Abstract: In response to the issues of repetitive paths and inefficiency in traditional AGV-based Goods-to-Person picking systems, a method for batch order splitting with an order splittable strategy has been proposed. The optimization objective by this method is to minimize the total time of AGV travel time and picking time. Firstly, a mathematical model for order batching based on split order strategy is established. Secondly, a double-layer genetic algorithm based on k -means clustering (KC-DL-GA) is designed to deal with the model, which could solve the problems of low quality of the initial population and slow convergence speed of the traditional genetic algorithm. The results show that the order batching method for the order splitting strategy proposed in this paper significantly increases the picking efficiency compared with the random batching strategy and the order non-splitting batching strategy. Compared with the double-layer GA algorithm, the KC-DL-GA algorithm has greater convergence speed and stronger stability.

Key words: order in batches; genetic algorithm; order splitting; clustering algorithm

收稿日期: 2024-01-19; 网络首发日期: 2024-04-17

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20240415.0856.002.html>

基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBGY-408); 西安市科技计划资助项目(23RKYJ0026)

第一作者: 孙军艳, 女, 博士, 副教授, 研究方向为物流信息、供应链管理。E-mail: 1427069529@qq.com

通信作者: 王子豪, 男, 硕士生, 研究方向为仓库协同调度。E-mail: daahao@126.com

合理的订单分批可以提升订单拣选效率。AGV 货到人拣选订单分批是将相似特征的货物放在同一批次,同一批次的货物分配到一个拣选站,以期减少 AGV 在仓库的移动次数,提高拣选效率。

订单分批策略通常分为订单可拆分和不可拆分两种情况。目前,国内外学者大多针对订单不可拆分情况的订单分批展开研究。王姗姗等^[1]以料箱总出库次数最少为目标函数,建立订单分批优化模型,利用混合交叉策略改进遗传算法进行求解,使料箱的总出库次数得到减少,提高拣选效率。秦馨等^[2]基于凝聚型聚类算法对订单分批进行建模求解,证明该算法的有效性。Jiang 等^[3]研究了堵塞情况下的订单分批排序问题,建立了以订单完成时间最短为目标的数学模型,提出了一种种子算法进行求解,数值实验证明了算法的优越性。李珍萍等^[4]建立了以订单分批拣选总成本最小化为目标的整数规划模型,设计了 K-max 聚类算法求解订单分批问题。李昆鹏等^[5]以最小化 AGV 搬运货架次数为目标建立订单分批模型,提出了基于货架相似度的两阶段订单分批算法,用实验进行验证。Aerts 等^[6]使用变邻域搜索算法,以最小化订单拣选行程为目标函数,将联合订单分批和路由问题建模为车辆集群配送问题,用 Hausdorff 距离计算路由,结果证明了算法的优越性。Shavaki 等^[7]研究了有到期日的在线订单分批和交付问题,提出一种混合整数非线性规划模型,同时解决订单分批、批次分配、卡车订单分配以及卡车调度和路径问题,并开发了两种基于规则的启发式算法来解决这些问题。张国维等^[8]以极小化货架搬运成本为目标,建立了 AGV 智能仓库订单分批问题的整数规划模型,并提出了一种基于订单和货架交替选择的贪婪求解算法,算例证明该策略可以大幅度降低货物拣选成本。综上,传统订单分批大多基于订单不可拆分策略,订单不可拆分策略将一个订单的货物分到同一个批次,当两个订单被分到不同批次时,如果这两个订单包含有相同的货物,就意味着该货物在不同的两个批次分别需要拣选一次,AGV 需要搬运两次。

订单可拆分策略可以将同一个订单的不同货物分到不同批次,将不同订单中相同的货物分在同一个批次中,这样该货物就只需拣选一次,因此 AGV 只需搬运一次货架。可见,当不同订单中含有相同的货物时,订单可拆分策略更具柔性,虽然会带来订单的二次拣选,但可能会进一步提高总拣选效率。目前,部分学者就订单可拆分策略下的订单分批问题展开研究。如张海龙等^[9]构建以订单履行成本最

低为目标的多仓库订单合并优化模型,并利用融合模拟退火的遗传算法对其求解,研究订单履行成本最低情况下的订单合并及车辆路径优化方案,并对模型的关键参数进行灵敏度分析以验证模型的有效性。徐菱等^[10]基于订单可拆分的思想,综合考虑时间窗和组合拣选策略特征,建立时间窗约束下需求可拆分的拣选与配送联合优化模型,通过算例验证了模型和算法的有效性。Parikh 等^[11]考虑了拣货时间、拣货阻塞、负载不平衡和系统需求等因素,提出了允许订单拆分的按区域拣选策略,实验结果表明这种方法是有效的。万明重等^[12]以最小化总延误时间为目标,考虑订单可拆分,并建立了相应的非线性 0-1 整数规划模型,结果表明拆分策略能明显减小智能仓库中订单拣选的总延误时间。Gil-Borrás 等^[13]将目标定为最小化所有订单完成拣选时间和最小化任务差异,利用启发式算法进行求解,结果表明实现了拣货员工作量的平衡和拣选效率的提升。以上学者均以订单的总拣选时间或总拣选成本作为最短作为优化目标,并采用改进传统算法求解。

一些学者将车辆运送路径长度作为优化目标。Briant 等^[14]基于某公司的案例研究了考虑订单拆分策略的订单分配、拣货车路径问题,提出了一种根据货物分类决策的拣货系统,最大限度地减少了拣货车的总行走距离。Cergibozan 等^[15]研究了拣货车系统的订单拆分问题,当订单过大时,将订单拆分交由不同的拣货车进行搬运,提高拣选效率。夏扬坤等^[16]以使用自动导引车数目最少、行驶费用和时间窗偏离费用最低分别作为第一、第二优化目标,结合最大路长、载重、需求依订单拆分及时间窗满足率限制,建立了相应的数学模型,并设计了一种自适应禁忌搜索算法求解该问题。潘晓等^[17]基于针对商超配送中多种配送方式共同面临的车辆配载和路径规划问题,考虑配送车辆容量限制,以最小化配送总成本为目标,构建了基于订单拆分的带容量限制商超配送路径规划模型,并设计了改进灰狼算法。宋健^[18]考虑了因为品类不足和数量不足两种情况引起的拆单,为企业设计了拆单数量最少的方案,建立了目标成本最小的配送路径规划的数学模型,优化后的最小订单的拆分方式减少了订单被拆分的数量,降低车辆配送和物流成本。

订单可拆分策略一方面减少了货架搬运次数,另一方面也增加了订单二次拣选时间,二者相互制约,相比传统拣选模式更加复杂。然而,当前多数文献没有考虑基于 AGV 的拣选系统中拆分订单带来

的二次拣选时间。本文以 AGV 货到人拣选系统为对象,基于拣选站进行订单分批,考虑所有订单的一次拣选时间和被拆分订单的二次拣选时间,最小化总分拣时间(包括 AGV 空载/负载运行时间、一次拣选时间、二次拣选时间、订单打包时间)为目标函数对订单分批进行优化研究。由于总拣选时间与 AGV 空载/负载运行时间,拆分订单的数量等因素相关,模型是批次构建和 AGV 路径规划的组合优化问题,属于 NP 难问题,算法求解上难度较大,设计 k 均值聚类双层遗传算法(k -means clustering double layer GA algorithm),简称 KC-DL-GA 算法,提高传统 GA 算法的种群质量和搜索效率,同时减小了陷入局部极小的可能,本文的研究对进一步提高 AGV 货到人拣选系统的拣选效率具有重要价值。

1 模型建立

1.1 问题描述

AGV 货到人拣选系统可以描述为:存在多个多层货架,其货架位置和分布情况固定且已知。有多种货物,每个货架可容纳多种货物。见图 1,当产生订单 $O_1, O_2, O_3, \dots, O_n$ 后,需将这些订单分批,并将同一批次分配至同一个拣选站。AGV 用于将货架送至拣选站,每个拣选站指派拣货员完成货物分拣,如果一张订单的所有货物在同一个拣选站进行拣选,则拣选完成后直接进行打包,完成分拣;如果一张订单的货物在不同的拣选站进行拣选,则需要流转至同一个出口再进行打包,完成分拣,分拣流程见图 1。

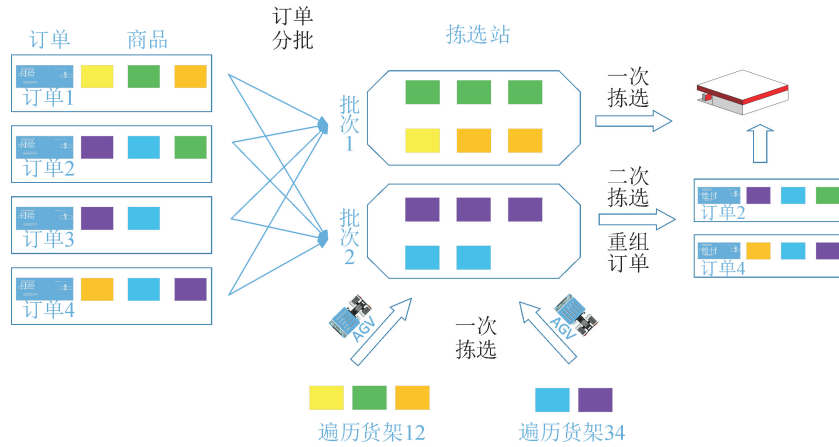


图 1 考虑订单拆分策略的订单分批流程

Fig. 1 Consider the order batching process for the split strategy

1.2 问题假设

- 1) 货物类型、分布及数量已知;
- 2) 所有订单信息已知;
- 3) 货物的库存足够,不考虑补货环节;
- 4) 不考虑 AGV 行进过程中的堵塞;
- 5) 订单中的货物可拆分到不同批次;
- 6) 订单中所有货物都有一个货架可供选择。

1.3 符号说明

模型的符号说明见表 1。

决策变量:

$$Y_{ij}^s = \begin{cases} 1, & \text{货架 } i \text{ 与 } j \text{ 为搬运到拣选站 } s \text{ 的} \\ & \text{拣货路径相邻点} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{io}^s = \begin{cases} 1, & \text{若订单 } o \text{ 包含的货物 } u \text{ 被分配到拣选站 } s \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

由于每一种货物都对应唯一的一个货架,定义被分配到拣选站 s 的货物 u 与货架 j 的关系为: $x_j^s: u \rightarrow j$, 因此,根据式(2),有:

$$x_{ju}^s = \begin{cases} 1, & \text{若货架 } j \text{ 中的货物 } u \text{ 被分配到拣选站 } s \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

表 1 符号说明

Tab. 1 Symbol description

符号	定义	单位
H	货架集合, $\{h_1, h_2, \dots, h_m\}$	
S	拣选站集合, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_p\}$	
O	订单集合, $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$	
U	货物种类集合, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$	
Q	每个拣选站允许分配的订单数量最大值	个
T_a	拣选站拣选单位货物所需一次拣货时间	s
T_b	拣选站拣选单位货物所需二次拣货时间	s
T_c	单位订单包装时间	s
d_{ij}	货架 i, j 之间的距离	m
v	AGV 行驶速度	m/s
z_{ou}	$\begin{cases} 1, & \text{订单 } o \text{ 中包含货物 } u \\ 2, & \text{否则} \end{cases}$	

1.4 目标函数

以最小化 AGV 行驶时间、拣选时间和包装时间为目标,建立优化模型,目标函数表示为式(4)。

$$\min T = \frac{F}{v} + \left(\sum_{s \in S} \sum_{u \in U} \sum_{o \in O} y_{uo}^s T_a + \sum_{o \in O} \sum_{u \in U} z_{ou} S_o T_b \right) + nT_c \quad (4)$$

式中:

$$F = \sum_{s \in S} \sum_{i \in H, s} \sum_{j \in H, s} d_{ij} Y_{ij}^s x_i^s x_j^s + \sum_{s \in S} \sum_{i \in H} 2d_{is} x_i^s \quad (5)$$

$$S_o = \begin{cases} 1, & \exists s \text{ 使得 } \sum_{o \in O, s \in S, u \in U} y_{ou}^s < \sum_{o \in O, u \in U} z_{ou} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

式(4)中,第一项表示 AGV 行驶时间。第二项表示订单的拣货时间,包括一次拣货时间和二次拣货时间,第三项表示包装时间。式(5)表示 AGV 的行驶距离,包括二个部分:AGV 在空载状态下从一个货架到另一个货架之间的距离,AGV 在负载状态下从货架到拣选站的往返距离。式(6)表示同一个订单在同一个某个拣选站进行拣选,即订单未拆分。

1.5 约束条件

$$\sum x_j^s = 1, \forall j \in H, s \in S \quad (7)$$

式(7)保证每个批次,每个拣选站只访问同一个货架一次。

$$\sum_{s \in S} y_{uo}^s > 1, \forall s \in S, o \in O \quad (8)$$

式(8)代表一个订单可以被拆分到多个拣选站进行拣选。

$$\sum_{s \in S} y_{uo}^s = \sum_{u \in U} z_{ou}, \forall u \in U, o \in O \quad (9)$$

式(9)代表订单 o 中的货物 u 均被分到某个拣选站。

$$\sum_{s \in S} y_{uo}^s < \sum_{u \in U} x_{ju}^s, \forall u \in U, s \in S \quad (10)$$

式(10)代表一个订单的同一种商品不能拆分至所有拣选站。

$$\sum_{u \in U} \sum_{o \in O} \frac{1}{p} y_{uo}^s \leq Q, \forall s \in S \quad (11)$$

式(11)代表拣选站的货物不能超过最大容量。

利用曼哈顿距离作为衡量仓库内两个位置之间的距离的标准,即计算起始点和终点在南北和东西方向上的两段距离之和,例如仓储内两个位置分别为 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$, 则使用曼哈顿距离计算两货位之间的距离公式为 $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ 。

2 算法设计

2.1 问题分析

传统 GA 算法通常采用随机生成初始种群的方

法,因此种群质量和收敛速度难以保证。为此,本文设计了一种基于 k 均值聚类的双层遗传算法,其核心主要有两点。一是采用 k 均值算法改善初始种群。 k 均值算法是一种典型的无监督学习算法,通过迭代的方式将数据点分配到最近的簇中,然后计算簇内平均值来更新簇的中心,迭代直至收敛。同一簇中的数据越相似,距离越小,不同簇中的数据差别越大,距离越远,分类效果越好。 k 均值算法的收敛速度相较其他算法更快,当簇的分布明显时, k 均值算法能够产生更加合理的聚类结果,尤其适用于本案例中的仓库货架分类。二是本文研究的目的是使得总拣货时间最小,这一问题需考虑订单分批和 AGV 的拣货路径长度两方面,两个问题之间相互关联,不同的分批策略导致 AGV 的拣货路径不同,单层遗传算法在求解此类问题时速度慢、效果差,故设计 k 均值聚类双层遗传算法联合优化模型。

2.2 KC-DL-GA 算法设计

2.2.1 算法步骤和基本流程

KC-DL-GA 算法包括内外两层 GA 算法,内层算法的目标是优化货物的分批方案,最小化拣选过程中的搬运距离和时间,外层算法的目标是优化内层算法的染色体,改进内层循环适应度。大致步骤为如下。

1) 基于货架序号聚类对订单进行初始分批,根据拣选站数量 s , 任意选择 s 种货物对应的货架作为初始类中心 $C(c=c_1, c_2, \dots, c_s)$, 此处的类中心均为坐标。

2) 遍历剩余货架集合 $\{x=x_1, x_2, \dots, x_k\}$, 按照损失函数将货架分配至各个类中,即分别计算出货架与几个中心点的最小损失函数作为分类指标,与哪个中心点的距离最短,则属于哪一簇。定义损失函数为:

$$J(i, c) = \min \sum_{j=1}^s \|x_i - c_j\|^2 \quad (12)$$

3) 计算当前各类中的坐标的平均值,得到新的类中心点 c'_j , 见式(13), 式中 q 表示在当前簇中所有的货架序号。

$$c'_j = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_i \quad (13)$$

4) 返回第 2) 步重新计算损失并重新分类,直到最终分类不再变化,得到分类结果。

5) 在不超过各拣选站容量的前提下,依次将各货物分批到距离最小的拣选站中,得到订单分批结果。聚类流程见图 2 上半部分。

6) 根据分批情况进行外层编码设计,生成外层

初始种群 C1。

7) 内层编码设计,根据订单分批结果,形成初始种群 C2;计算内层 C2 适应度值,即 AGV 行驶距离。

8) 通过选择、交叉、变异操作生成新的染色体,即 C2 新种群。

9) 对迭代数进行判定,若迭代数没有达到 Maxgen2,则进行适应度计算,返回第 8)步;若迭代数达到了 Maxgen2,则获得订单分批结果中各拣选站的搬运路径和距离。

10) 计算外层 C1 适应度值。

11) 产生新个体,通过选择、交叉、变异操作产生 C1 新种群。

12) 判断算法是否已迭代最大次数 Maxgen1,若已达到,则算法结束,并生成最终分批结果和总的时间 T ;若否,则返回第 6)步判断是否满足拣选站容量,若满足容量则继续步骤 7),不满足则令 $f_1 = 0$,返回步骤 11)。具体流程见图 2。

2.2.2 编码设计与内层适应度计算

通过聚类方法确定好初始订单分批结果后,进行外层种群的编码设计,通过内层遗传算法对每个拣选站搬运的货架进行路径优化。

1) 外层染色体编码设计,编码方案基于前面订单分批的 n 个结果,采用实数编码,生成订单分批和拣选站分配的初始种群,将其定义为外层染色体 C1。染色体的每个非 0 数值代表一个订单中的某一种货物。构造染色体时采用排列编码法,第一个订单中的第一种货物编码为 1,第二种货物编码为 2,依次针对不同货物种类进行排列编码。

2) 内层染色体 C2 表示每个拣选站的货架搬运路径,即货架序号和搬运顺序即为基因排列。例如 $C2 = [3, 5, 22, 33, 16, 7]$,其中基因值代表货架编号,基因位对应货架的排序,此编码串表示该拣选站的货架搬运顺序为 3-5-22-33-16-7。生成路径优化初始种群。

3) 计算 C2 种群适应度值 f_2 ,定义其适应度函数为 AGV 行走距离的倒数, f_2 的值越小,个体的生存优势越大。 f_2 用公式表达为:

$$f_2 = 1/F \quad (14)$$

4) 产生新个体,通过选择、交叉、变异操作生成新的染色体,即 C2 新种群。内层采用轮盘赌选择法,每个个体的选择概率与其适应度成正比,从一个随机旋转的轮盘上进行选择。轮盘大小和概率分布与种群中的个体对应。轮盘设置为 0 到 1 的连续区间,而每个个体的选择概率决定了其在轮盘上的占

比,适应度更高的个体更有可能被选中。

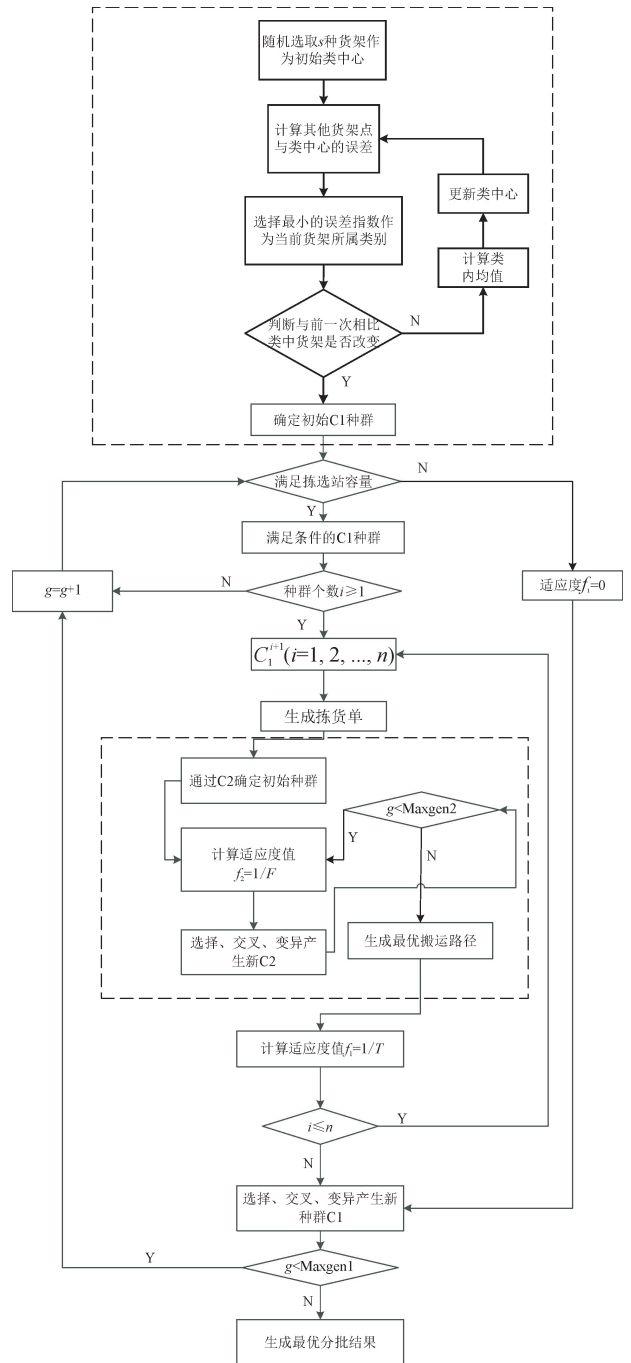


图 2 KC-DL-GA 算法设计流程图

Fig. 2 Design flowchart of KC-DL-GA algorithm

交叉操作将两个父代个体中的部分染色体进行交换,本方法中使用随机位置交叉,例如两父代个体 $C1 = [3 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 1]$, $C2 = [1 \ 3 \ 3 \ 3 \ 2 \ 1]$,如果交叉位置数的两个点为 1 和 4,那么子代个体为 $C1' = [1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 1]$, $C2' = [3 \ 2 \ 3 \ 2 \ 2 \ 1]$ 。

变异操作将某段染色体进行改变,内层采用位元翻转法进行变异。如 $C1 = [3 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 1]$,将染色体中的 3 和 1 进行变异,结果为 $C1' = [1 \ 3 \ 2 \ 2 \ 1 \ 3]$ 。

5) 对迭代数进行判定,若迭代数没有达到 Maxgen2 ,则进行适应度计算,运行下一次循环;若迭代数达到了 Maxgen2 ,则中断整个流程,获得订单分批结果中各拣选站的搬运路径和距离。

2.2.3 外层循环与适应度计算

1) 外层适应度通过内层运行结果进行计算,计算 C1 种群适应度值 f_1 ,定义其适应度函数为目标函数 T 的倒数,判定 C1 种群是否都进行了路径优化,若否,则返回进行路径优化;若是,则进行下一步。 f_1 用公式表达为:

$$f_1 = 1/T \quad (15)$$

2) 产生新个体,通过选择、交叉、变异操作产生 C1 新种群,外层依然使用轮盘赌选择法,扇形的角度同适应度成正比。交叉采用部分匹配交叉法,随机选择交叉点。最后判断分批结果是否满足拣选站容量,若不满足则进行可行化调整。

3) 判断算法是否已迭代最大次数 Maxgen1 ,若已达到,则算法结束,并生成最终分批结果和总的时间 T ;若否,则进行下一轮迭代。

3 仿真实验及结果分析

3.1 参数设置

模型的相关参数设置见表 2。

表 2 拣选系统实验参数

Tab. 2 Picking system small-scale experimental parameters

参数	小规模	大规模	单位
k	36	90	种
T_c	1	1	s
n	30	100	个
p	3	8	个
m	300	300	个
v	1	1	m/s

种群大小设为 100,交叉概率 $P_c=0.9$,变异概率 $P_m=0.1$,包装时间 $T_c=1$,每个订单包含货物种类为 1~3 种,算法最大迭代次数均设为 200 次,拣选系统参数见表 2。设置小规模算例和大规模算例两种。小规模算例中货物种类为 36 种,订单 30 个,拣选站 3 个;大规模算例中货物种类为 100 种,订单 100 个,拣选站 8 个。

拣选系统的地图模型见图 3,以大规模为例,下面 8 个黑色网格块为拣选站,上面的 2×10 黑色网格组为货架,使用 MATLAB 仿真软件对不同规模的订单分批问题进行仿真。

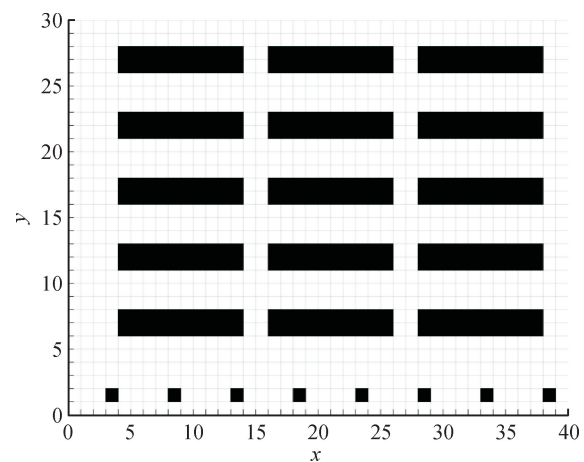


图 3 仓库布局图

Fig. 3 Warehouse layout

3.2 分批结果和货架搬运次数分析

小规模算例和大规模算例计算结果见表 3 和表 4,表中可以清晰的看出订单是否被拆分且被拆分至哪个拣选站。小规模算例中,被拆分的订单有:3,6,8,10,11,12,15,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30;大规模算例中,被拆分的订单有 2,12,15,16,21,22,25,27,38,40,41,42,45,47,50,51,52,61,66,68,73,77,78,85,89,94,98。

表 3 小规模算例计算结果

Tab. 3 Results from small-scale example calculation

拣选站 s	订单编号	货物总数
1	2,3,4,5,9,10,11,13,16,20,21,22,23,26,27,28,29	123
2	6,8,10,12,15,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,29,30	123
3	1,3,6,7,8,11,12,14,15,19,21,22,24,25,26,28,30	124

表 4 大规模算例计算结果

Tab. 4 Results from large-scale example calculation

拣选站 s	订单编号	货物总数
1	73,16,77,42,94,52,38,85,2,41,78,27,89,45,98,100,61,40	99
2	2,30,70,12,65,77,42,59,8,21,91,56,47,9,35,71	98
3	61,38,73,29,92,54,7,10,87,18,68,96,53,3,79	93
4	88,67,51,14,98,24,63,37,6,99,41,84,13	98
5	17,75,40,76,94,50,86,25,72,90,46,26,20,80,55	95
6	95,64,33,78,48,2,16,51,81,89,43,11,22,34,52,45	92
7	15,85,28,62,5,39,49,32,60,27,69,74,66,36,57,83,21	100
8	4,23,82,1,44,97,58,31,93,66,68,47,50,2,19,12	95

搬运次数统计见图4,可以发现,与随机分批方法相比,本文提出的订单拆分分批方法的货架搬运次数减少了30.12%;与订单不拆分分批方法相比,货架搬运次数减少了17.14%。

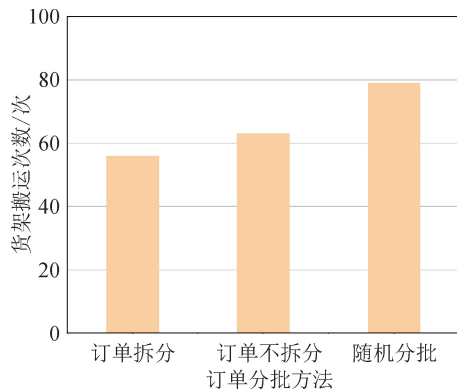


图4 不同订单分批方法的货架搬运次数对比
Fig. 4 Comparison of shelf handling times by different order batching methods

3.3 算法有效性分析

基于 k 均值聚类双层遗传算法和双层遗传算法(GA)的计算迭代过程见图5,可以发现,由于遗传算法是一种基于自然生物进化原理的优化算法,在运行过程中会出现一定程度的随机性,所以取迭代过程中的最优解作为最佳分批结果, k 均值聚类双层遗传算法收敛速度很快,大规模算例求解总时间比双层GA算法缩短了3.5%,小规模算例求解总时间比双层GA算法缩短了约36.2%,证明了使用聚类算法改善初始解,可以明显减少计算总时间,使得收敛更加快速,且整体的求解结果更好,稳定性能更优。

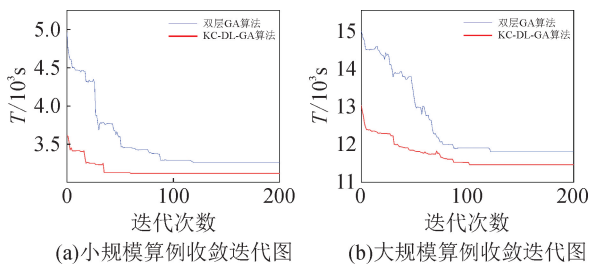


图5 算法收敛迭代对比图

Fig. 5 Comparison of algorithm convergence iteration

3.4 搬运次数和二次拣选时间分析

分析二次拣选时间与货架搬运次数、订单拆分数目之间的关系,将大规模算例的二次拣选时间分别设置为2.5、3.0、3.5、4.0、5.0个单位时间,求得的货架搬运次数为56次、53次、45次、41次、34次,对应的订单拆分数目为15个、18个、25个、31个、38个,见图6和图7。由图6可以发现,货架搬运次数与二次拣选时间呈反比,由图7可以发现,拆分订单的数量与二次拣选

时间呈正比,即订单拆分越多,货架搬运次数越少。综合来看,订单不是拆分的越多,整体拣货效率越优,订单拆分的数量与二次拣选时间密切相关,当二次拣选时间较长时,采用本文提出的订单拆分策略进行拣选可以大幅度减少货架搬运次数,提高拣选效率。

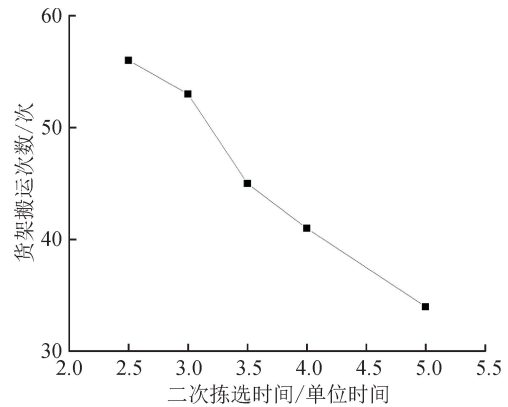


图6 货架搬运次数随二次拣选时间变化情况
Fig. 6 Variation of shelf relocation frequency with respect to the secondary picking time

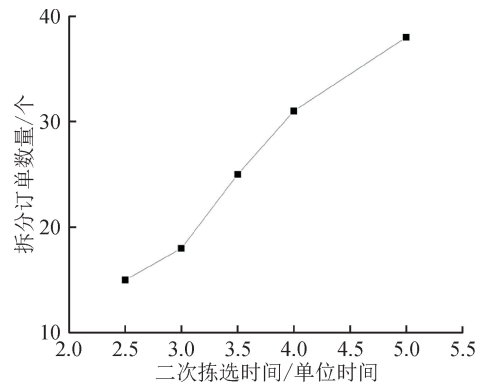


图7 拆分订单数量随二次拣选时间的变化情况
Fig. 7 Variation of split order quantities with respect to the secondary picking time

4 结论

本文采用订单拆分策略优化拣选作业,构建了以总拣选时间最短为目标的订单分批优化模型,并利用改进的 k 均值聚类算法生成初始订单分批结果,使用双层遗传算法求解本章所构建的模型。结果表明本文提出的订单拆分分批模型较随机分批方法和订单不拆分方法的货架搬运次数更少,有效提升了拣选效率。提出的KC-DL-GA算法较传统双层遗传算法的求解速度更快,处理本模型时更加稳定可靠,解的质量更高。本文的研究对AGV货到人拣选系统进一步减少总拣选时间,提高总拣选效率具有重要的现实价值,也为其他货到人拣选系统优化提供决策参考。

参考文献:

- [1] 王姗姗, 张纪会. “货到人”拣选系统订单分批优化[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2022, 19(3): 74-80.
WANG Shanshan, ZHANG Jihui. Order batch optimization for “Part-to-Picker” order picking systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2022, 19(3): 74-80.
- [2] 秦馨, 赵剑道, 任楠. 基于聚类算法的订单分批策略研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(1): 134-137.
QIN Xin, ZHAO Jiandao, REN Nan. Research on order batching strategy based on clustering algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(1): 134-137.
- [3] 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]. 2022, 187: 115943.
- [4] 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.
- [5] 李昆鹏, 刘腾博. “货到人”拣选系统中电商订单分批优化研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(12): 16-23, 30.
LI Kunpeng, LIU Tengbo. A study on E-commerce order batching optimization of “cargo-to-person” picking system[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(12): 16-23, 30.
- [6] AERTS B, CORNELISSENS T, SÖERENSEN K. The joint order batching and picker routing problem: modelled and solved as a clustered vehicle routing problem[J]. Computers & Operations Research, 2021, 129: 105168..
- [7] SHAVAKI F H, JOLAI F. Formulating and solving the integrated online order batching and delivery planning with specific due dates for orders[J]. Journal of intelligent & fuzzy systems: Applications in Engineering and Technology, 2021, 40(3): 4877-4903.
- [8] 张国维, 吴凌云. 考虑商品数量和商品拣选成本的 AGV 智能仓库订单分批问题研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(12): 9-15.
ZHANG Guowei, WU Lingyun. Research on the order batching problem in the AGV-based intelligent warehouse considering the product quantity and the product picking cost[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(12): 9-15.
- [9] 张海龙, 陈淮莉. 在线订单拆分合并的多仓库打包决策[J]. 上海海事大学学报, 2023, 44(3): 100-106.
ZHANG Hailong, CHEN Huaili. Multi-warehouse packaging decision-making for online order splitting and consolidation[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2023, 44(3): 100-106.
- [10] 徐菱, 胡小林, 胡小亮. 时间窗约束下需求可拆分的拣选与配送联合优化问题研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(2): 18-29.
XU Ling, HU Xiaolin, HU Xiaoliang. Integrated optimization of picking and split delivery problem under time windows[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2020, 18(2): 18-29.
- [11] PARIKH P J, MELLER R D. Selecting between batch and zone order picking strategies in a distribution center[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(5): 696-719.
- [12] 万明重, 蒋忠中, 秦绪伟, 等. 考虑拆分策略的智能仓库订单拣选优化问题[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.
- [13] GIL-BORRÁS S, PARDO E G, ALONSO-AYUSO A, et al. A heuristic approach for the online order batching problem with multiple pickers[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 160: 107517.
- [14] BRIANT O, CAMBAZARD H, CATTARUZZA D, 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.
- [15] CERGIPOZAN Ç, TASAN A S. Order batching operations: an overview of classification, solution techniques, and future research[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(1): 335-349.
- [16] 夏扬坤, 符卓, 谢九勇. 依订单拆分的多自动导引车物料配送路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(7): 1520-1528.
XIA Yangkun, FU Zhuo, XIE Jiuyong. Material distribution route planning for multiple automated guided vehicles with split deliveries by order[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(7): 1520-1528.
- [17] 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.
- [18] 宋健. 考虑订单拆分的 A 企业配送路径优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
SONG Jian. Research on distribution route optimization of enterprise a considering order splitting[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

(责任编辑 王绪迪)