DOI: 10.3901/JME.2019.18.225

“四向车”拣选系统订单排序优化*

田彬 吴颖颖 吴耀华 曹伟洁
(山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

摘要:“四向车”拣选系统采用“四向车-提升机-辊道”的作业模式,可有效提高订单拣选效率,缩短订单拣选时间,近年来得到了广泛应用。目前,优化订单拣选时间成为提高“四向车”拣选系统效率的关键因素及难点问题。为缩短订单拣选时间,提高“四向车”拣选系统效率,提出一种批量订单排序的优化模型,模型的优化目标可简化为缩短“四向车”在储位之间的往返时间。由订单排序模型的特点可知,在订单总量大于50时,该模型可确定为NP-Hard问题,难以在有限时间内求得最优解。为在有限时间内求得可接受范围内的解,提出改进耦合度订单排序贪婪算法,根据订单储位耦合度大小对批量订单进行排序并确定各订单中SKU拣选顺序,从而最小化批量订单拣选时间。试验结果表明,相比传统算法,该算法可以有效缩短订单拣选时间,提高拣选系统效率。

关键词:“四向车”拣选系统;货到人;订单排序;耦合度;拣选时间

中图分类号: F253

Order Sequencing Optimization for “Four-Way” Shuttle Based Order Picking System

TIAN Bin WU Yingying WU Yaohua CAO Weijie
(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: The “Four-Way” shuttle based order picking system has been widely used in recent years, which adopts the “Four-Way shuttle-Hoister-Roller” operation model and can effectively enhance order picking efficiency and shorten order picking time. At present, the optimization of order picking time has become a key factor and difficult problem to improve the efficiency of the four-way shuttle based order picking system. To shorten order picking time and enhance the efficiency of “Four-Way” shuttle picking system, an optimization model is proposed for batch order sequencing whose target is simplified to decrease the travel time of four-way shuttles between storage positions. Considering the characteristic of order sequencing problems when the order quantity is larger than 50, this model can be seen as NP-hard problem, which is hard to obtain the optimal solution within limited time. To attain a solution under an acceptable range within limited time a modified coupling degree greedy algorithm is developed to solve this problem, which is mainly based on order storage position coupling degree for determining the sequence of orders and SKUs so as to minimize the order picking time. The test results show that compared with traditional algorithms this algorithm can effectively cut down order picking time and increase the picking system’s efficiency.

Key words: “four-way” shuttle system; part-to-picker; order sequencing; coupling degree; order picking time

0 前言

多层穿梭车拣选系统作为一种典型的“货到人”拣选系统(Part-to-picker),相对于传统的“人到货”拣选系统(Picker-to-part),可有效减少拣选人员往返于货架之间的行走时间,提高拣选效率,近年来在电商、医药等行业中得到了广泛应用。“四向车”拣

选系统是多层穿梭车系统的一种特殊形式,由“四向”穿梭车(简称为“四向车”)、货架、提升机、辊道等设备组成。传统多层穿梭车系统中,穿梭车仅在固定的巷道及层间运行,而在“四向车”拣选系统中,“四向车”可在多个巷道及多层间切换运行辊道,这使“四向车”拣选系统具备柔性强、成本低等优点,近年来成为拣选系统发展的热点。

在“四向车”拣选系统中,货箱存储在货架中。拣选台在接到拣货命令时向货箱发出出库指令,货箱由“四向车”、辊道、提升机输送至拣选台并由拣

* 国家自然科学基金资助项目(61703241)。20181205 收到初稿,20190411 收到修改稿

选人员进行拣选。当拣选完一个货箱之后, 拣选人员判断下一订单是否需要该货箱中的货物。如果需要则将该货箱放至订单缓存位等待下一订单拣选; 否则, 由提升机、辊道、“四向车”等设备将该货箱回库。由于订单缓存位和“四向车”数量有限, 因此合理地对订单进行排序, 增加前后订单需要同一货箱的概率, 使货箱出入库一次可满足较多订单需求, 可有效减少货箱出入库次数以及“四向车”切换层与巷道的作业频率, 进而提高订单拣选效率。另一方面, 当前后订单需要不同货箱时, 合理的订单次序可增加前后订单货箱分布在同一巷道, 同一层的概率, 同样可减少“四向车”切换层与巷道的频率, 提高拣选效率。因此, 订单排序优化对于提高“四向车”拣选系统的拣选效率极为重要。

目前国内外对于多层穿梭车系统的订单排序优化问题研究较少。大多数关于系统拣选策略优化方向的文献主要集中在人工拣选系统的分批优化方向。NOUDGADEMANN 等^[1]首次计算了订单分批问题的复杂度, 并证明该问题为 NP 难问题, 最后通过列生成法将该问题作为一般分割问题进行求解。PETERSEN 等^[2]通过考虑订单分批策略对人工拣选系统效率影响发现对于小批量订单, 订单分批能最大程度节省总成本。HENN 等^[3]提出一种启发式算法对人工拣选系统订单进行分批与排序以最小化订单延迟。HO 等^[4]分析了双交叉通道仓库的订单分批, 文章通过种子订单加附属订单的方法对订单进行分批处理。LI 等^[5]同时考虑了电商仓库中的订单分批与路径规划问题, 结果表明综合考虑多种因素时订单拣选效率高于仅考虑一种情况时的拣选效率。JANE 等^[6]提出一种启发式算法用于计算订单耦合度并对订单进行聚类以平衡拣选人员工作量, 减少系统等待。RENE 等^[7]总结了订单拣选流程控制与设计中的经典决策问题, 包括储位分配, 布局设计, 路径规划, 订单分批与分区存储等。HENN^[8]将静态订单分批的启发式算法改进并用于动态分批以最小化最大订单完成时间。MATTEWS 等^[9]提出一种松弛整数规划法用于解决单向传送带系统的订单排序问题。HENN^[10]将变邻域下降法和邻域搜索法用于订单排序以最小化订单延迟, 最终数据结果表明该方法可以提高订单拣选效率。

其他优化方向如路径规划, 储位分配, 订单拆分与合并等近年来也得到了广泛研究。张贻弓等^[11]建立了双拣货区自动分拣系统品类分配问题的 0-1 规划模型, 最后通过最大最小蚁群算法进行求解。ZHANG 等^[12]为了优化人工拣选的电商仓库中订单周转时间, 提出基于固定时间窗订单分批的混合分

批算法, 结果表明该算法在多个拣选工人的情况下能有效降低周转时间和人工成本。ZHANG 等^[13]考虑了电商供应链生产排程问题, 提出改进订单分批算法, 试验表明该算法可有效降低总成本, 鲁棒性较好。VALLE 等^[14]建立了带有指数约束的整数规划模型解决人工拣选仓库中的订单分批与路径规划问题, 并通过启发式算法对订单进西宁分批, 该方法可以直接用于指导实践。BOYSEN 等^[15]建立基于 KIVA 小车的自动化仓库中订单分批和订单排序的决策模型, 作者利用降维法对该问题进行求解, 相比于传统方法, 该模型可以在保证服务水平的前提下减少 KIVA 小车使用数量, 降低成本。ZULJ 等^[16]提出一种针对大规模订单分批的启发式算法, 该算法基于自适应大邻域搜索算法和禁忌搜索算法, 对于订单量在 600 以内的大规模订单, 该方法表现更好。BAHRAMI 等^[17]主要分析了分销中心大批量订单的储位分配策略, 仿真结果表明文章所提策略相比传统策略可以缩短订单完成时间, 提高效率。

吴颖颖等^[18]提出一种基于订单耦合度的订单排序法用于“货到人”订单拣选系统以减少货箱出入库次数。但其应用背景为固定层和巷道的穿梭车系统, 与本文中的“四向车”系统拣选流程及特点均不同, 因此不适用于“四向车”拣选系统。

本文结合“四向车”拣选系统的特点, 提出一种改进耦合度订单排序算法, 以最小化订单拣选时间为目标对批量订单拣选进行排序优化, 提高订单拣选系统效率。

1 “四向车”拣选系统

“四向车”拣选系统是指在自动化仓库中, 货物由“四向车”等自动化设备送至拣选台由拣选人员进行拣选的一种自动化储分一体系统。“四向车”拣选系统包括货架, “四向车”, 提升机, 拣选台和拣选人员等, 如图 1 所示。不同于传统穿梭车拣选系统, “四向车”拣选系统中的“四向车”可以跨巷道, 跨层作业, 从而大大提高了系统柔性, 同时该系统还可以根据订单拣选需求灵活调整“四向车”数量, 使系统适用于拣选量变化较大的物流配送中心。

“四向车”拣选系统订单拣选流程如下。① 系统将订单批量平均分配至各拣选台; ② “四向车”取出货箱; ③ 提升机将载有货箱的“四向车”输送至第一层; ④ “四向车”将货箱按出库线路, 如图 1 左侧带箭头虚线所示, 输送至拣选台; ⑤ 拣选人员对货物进行拣选; ⑥ 拣选人员判断下一订单是否需要当前货物, 如果需要, 继续判断订单缓存位是否

图1 “四向车”拣选系统

已满,如果订单缓存位未满足且下一订单需要该货物,则缓存该货箱;如果下一订单不需要该货物或者订单缓存位已满,则将该货箱按原线路相反路径回库;⑦ 进行下一货物拣选直至当前订单拣选完成;⑧ 判断该批订单是否拣选完毕,若未完毕则返回步骤②,流程如图2所示。

在“四向车”拣选系统中,“四向车”可以在水平方向跨巷道作业,同时也可以垂直方向与提升机进行跨层作业。一般的订单排序方法如顺序拣选会造成货箱频繁出入库增加设备损耗,同时也会使“四向车”频繁进行跨巷道和跨层作业增加订单拣选时间,降低拣选效率。为解决这一难题,本文首先针对“四向车”拣选系统,建立改进耦合度的订单排序模型,然后设计改进耦合度订单排序算法,对系统中各拣选台的订单进行排序优化,避免设备损耗与减少资源闲置,同时缩短订单拣选时间,提高订单拣选效率。

2 改进耦合度订单排序模型

2.1 条件与假设

本文所有假设如下。

- (1) 每个 SKU 放置于一个货箱且每个货箱位置固定。
- (2) 每个货箱中的 SKU 数量足够,均能满足一次订单拣选需求。
- (3) “四向车”可以进行跨巷道和换层作业,且每次只能运送一个货箱。“四向车”完成任务后停放于任务完成处。
- (4) 拣选台按单拣选,只有当前订单拣选完成才可以进行下一单的拣选。
- (5) 每个拣选台订单缓存位数量相同。

图2 “四向车”拣选系统订单拣选流程

2.2 订单排序模型

2.2.1 订单拣选时间

(1) 先计算“四向车”在两储位之间移动耗时,即“四向车”从储位 k 到储位 s 的耗时 t_{ks} , t_{ks} 的计算包括以下三种情况。

- 1) 如果 $x_k \neq x_s$, 则

$$t_{ks} = (w_1 + 2w_2) |x_k - x_s| / v_2 + h(y_k + y_s) / v_1 + l(z_k + z_s) / v_2 \quad (1)$$

- 2) 如果 $x_k = x_s, y_k \neq y_s$, 则

$$t_{ks} = h |y_k - y_s| / v_1 + l(z_k + z_s) / v_2 \quad (2)$$

- 3) 如果 $x_k = x_s, y_k = y_s$, 则

$$t_{ks} = l |z_k - z_s| / v_2 \quad (3)$$

式中, $k, s = 1, 2, \dots, n_3$, n_3 为总储位数。 (x_k, y_k, z_k) 表示储位 k 所在的巷道号, 层号, 列号。 $x_k = 1, 2, \dots, a_3$, $y_k = 1, 2, \dots, a_2$, $z_k = 1, 2, \dots, a_1$, a_1 为货架列数, a_2 为货架层数, a_3 为巷道数。 l 为单个储位长, h 为单个储位高, w_1 为巷道宽, w_2 为单个储位宽, v_1 为提

升机运行速度, v_2 为“四向车”运行速度。

对于订单 i 和订单 j , “四向车”在订单 i 所包含 SKU 的储位与订单 j 所包含 SKU 的储位之间移动所耗时长如式(4)所示

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} t_{i_1 j_1} & \cdots & t_{i_1 j_{p_j}} \\ t_{i_2 j_1} & \ddots & t_{i_2 j_{p_j}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{i_{p_i} j_1} & \cdots & t_{i_{p_i} j_{p_j}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, i_α 、 j_β 分别为订单 i 的第 α 个 SKU 的储位位置和订单 j 的第 β 个 SKU 的储位位置, p_i 、 p_j 为两订单 i 和 j 所包含 SKU 总个数, $0 \leq p_i, p_j \leq n_i$, n_i 为总 SKU (Stock keeping unit) 数, 即总货物品规数。 $i, j = 1, 2, \dots, Q$, Q 为总订单数。 $t_{i_\alpha j_\beta}$ 为“四向车”从订单 i 的第 α 个 SKU 的储位到订单 j 的第 β 个 SKU 的储位所用时长。

(2) 计算“四向车”拣选订单 i 和订单 j 时在 SKU 储位之间的转换时间。

假设订单 i 和 j 所包含 SKU 数分别为 p_i 、 p_j , 因此“四向车”拣选订单 i 和订单 j 时在 SKU 储位之间的转换时间如式(5)所示

$$T'_{ij} = \min \sum_{1 \leq \alpha \leq p_i} \sum_{1 \leq \beta \leq p_j} t_{i_\alpha j_\beta} y_{i_\alpha j_\beta} \quad (5)$$

式中, $y_{i_\alpha j_\beta}$ 为 0-1 变量, $y_{i_\alpha j_\beta} = 1$ 表示订单 i 中第 α 个 SKU 与订单 j 中第 β 个 SKU 相同, $y_{i_\alpha j_\beta} = 0$ 表示不同。其中 $\alpha = 1, 2, \dots, p_i$, $\beta = 1, 2, \dots, p_j$ 。

(3) 计算“四向车”拣选订单 i 和订单 j 时的出入库耗时 T_{ij}^* 。

由于订单缓存位有限, “四向车”拣选订单 i 和订单 j 的出入库分为以下两种情况。

1) 订单 i 和订单 j 的相同 SKU 数即耦合度 τ_{ij} 大于暂存位数量 m_1 即 $\tau_{ij} > m_1$, 此时只能优先缓存距离拣选台较远的前 m_1 个货箱, “四向车”拣选订单 i 和订单 j 的出入库耗时 T_{ij}^* 如式(6)所示

$$T_{ij}^* = 2 \left(\sum_{1 \leq \alpha \leq p_i} t_{i_\alpha 0} + \sum_{1 \leq j_\beta \leq p_j} t_{j_\beta 0} - \sum_{\delta \in D_{ij}} t_{\delta 0} \right) \quad (6)$$

式中, D_{ij} 为订单 i 和订单 j 所包含的前 m_1 个相同 SKU 集合, $t_{i_\alpha 0}$ 为“四向车”从订单 i 的第 α 个 SKU 储位到拣选台耗时, 如式(7)所示

$$t_{i_\alpha 0} = (w_1 + 2w_2)x_{i_\alpha} / v_2 + hy_{i_\alpha} / v_1 + lz_{i_\alpha} / v_2, \quad \alpha = 1, 2, \dots, p_i \quad (7)$$

2) 订单 i 和订单 j 的相同 SKU 数即耦合度 τ_{ij} 不超过暂存位数量 m_1 即 $\tau_{ij} \leq m_1$ 时, 订单 i 和订单 j 所有相同 SKU 货箱都可以缓存于暂存位以避免二

次出库。此时, “四向车”出入库耗时同样如式(6)所示, 但其中 D_{ij} 变为订单 i 和订单 j 所包含的所有相同 SKU 集合。

(4) 计算拣选该批订单总耗时 T 。

假设第 φ 个拣选台订单拣选顺序为 $\{V_1, V_2, \dots, V_{q_\varphi}\}$, q_i 为各拣选台订单数, $i = 1, 2, \dots, n_2$, n_2 为拣选台数量。因此完成该批订单拣选的总耗时 T 如式(8)所示

$$T = 2 \sum_{1 \leq k \leq q_{V_1}} t_{k0} + \sum_{k=1}^{q_\varphi-1} (T_{V_k V_{k+1}}^* + T_{V_k V_{k+1}}') \quad (8)$$

式中, $2 \sum_{1 \leq k \leq q_{V_1}} t_{k0}$ 为拣选第一个订单即订单 V_1 所包含 SKU 的出入库耗时。同时可得总出入库次数为 τ 即订单拣选 SKU 数与前后两订单缓存 SKU 总量之差, 如式(9)所示

$$\tau = \sum_{i=1}^{q_\varphi} \sum_{j=1}^{n_1} x_{ij} - \sum_{j=1}^{q_\varphi-1} \min \left\{ \sum_{j=1}^{n_1} x_{V_i j} x_{V_{i+1} j}, m_1 \right\} \quad (9)$$

式中, x_{ij} 为 0-1 变量, $x_{ij} = 1$ 表示订单 i 包含 SKU j , $x_{ij} = 0$ 表示订单 i 不包含 SKU j 。

2.2.2 改进耦合度订单排序模型

当订单 i 与订单 j SKU 储位的耦合度较大时, 通过将两订单调整为顺序相邻拣选可以减少“四向车”和提升机的重复作业次数, 最终缩短订单拣选时间, 可以大大提高自动化仓库的作业效率。

综合考虑订单拣选时间和储位约束条件, 可得改进耦合度订单排序模型。

$$\min T = 2 \sum_{1 \leq k \leq q_{V_1}} t_{k0} + \sum_{k=1}^{q_\varphi-1} (T_{V_k V_{k+1}}^* + T_{V_k V_{k+1}}') \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \quad T'_{V_i, V_{i+1}} = \min \sum_{1 \leq \alpha \leq p_{V_i}} \sum_{1 \leq \beta \leq p_{V_{i+1}}} t_{V_{i\alpha} V_{i+1\beta}} y_{V_{i\alpha} V_{i+1\beta}} \quad i = 1, 2, \dots, q_\varphi - 1 \quad (11)$$

$$T_{V_i V_{i+1}}^* = 2 \left(\sum_{1 \leq V_{i\alpha} \leq p_{V_i}} t_{V_{i\alpha} 0} + \sum_{1 \leq V_{i+1\beta} \leq p_{V_{i+1}}} t_{V_{i+1\beta} 0} - \sum_{\delta \in D_{V_i V_{i+1}}} t_{\delta 0} \right) \quad (12)$$

$$D_{V_i V_{i+1}} = V_i \cap V_{i+1}, i = 1, 2, \dots, q_\varphi - 1 \quad (12)$$

$$\sum_{\alpha \in V_i} y_{\alpha\beta} = 1 \quad \beta \in V_{i+1}, i = 1, 2, \dots, q_\varphi - 1 \quad (13)$$

$$\sum_{\beta \in V_{i+1}} y_{\alpha\beta} = 1 \quad \alpha \in V_i, i = 1, 2, \dots, q_\varphi - 1 \quad (14)$$

目标函数式(10)为最小化完成该批订单拣选所需的总时间; 式(11)表示拣选两相邻订单“四向车”跨层与换巷道的转换时间; 式(12)表示“四向车”拣选两相邻订单往返于储位与拣选台的时间; 式(13)、(14)表示拣选两相邻订单中 SKU 的拣选顺序关系, $y_{V_{i\alpha} V_{i+1\beta}} = 1$ 表示订单 V_i 中货物 α 与订单 V_{i+1} 中

β 依次拣选, $y_{V_{i\alpha} V_{i+1\beta}} = 0$ 表示两个 SKU 非依次拣选。

考虑到订单量为 n , 订单所包含 SKU 为 m 时该问题的遍历法时间复杂度为 $O(n^2 \times m)$, 对于较大订单量(大于 50)和较大 SKU 数来说, 该方法无法在有限时间内求得最优解。因此, 本文设计改进耦合度订单排序算法则对该问题进行快速求解。

3 改进耦合度订单排序算法

为了对上述模型进行求解分析, 本文设计改进耦合度订单排序算法。求解算法流程如下。

(1) 计算拣选台订单量即进行订单分配。

在“四向车”拣选系统中, 系统将 Q 个订单依次分配到 n_2 个拣选台, q_i 表示第 i 个拣选台所分配到的订单数量。

$$q_i = \begin{cases} \lfloor Q/n_2 \rfloor & i=1, 2, \dots, n_2-1 \\ Q - \lfloor Q/n_2 \rfloor (n_2-1) & i=n_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中, 前 n_2-1 个拣选台依次分配到 $\lfloor Q/n_2 \rfloor$ 个订单, 其余订单 $Q - \lfloor Q/n_2 \rfloor (n_2-1)$ 全部分配到第 n_2 个拣选台。

(2) 计算订单 SKU 耦合度得到种子订单即确定拣选台第一个拣选的订单。

假设第 φ 个拣选台分配到 q_φ 个订单, 不同于文献[11]通过计算 q_φ 个订单中两订单之间 SKU 耦合度得到两订单耦合度矩阵, 并取其中最大值作为种子订单。

具体方法如下。① 计算 q_φ 个订单中两订单之间的相同 SKU 数即耦合度, 得到订单耦合度矩阵; ② 得到各订单与剩余订单耦合度之和; ③ 取与其余订单耦合度最大的订单作为种子订单。

相比于文献[11]所提的方法, 该方法可以避免批量订单中某两订单之间耦合度较大但是与其余订单耦合度较小的情况, 从而减少“四向车”跨巷道和换层作业次数。

拣选台 φ 的第 i 个订单所包含 SKU 可以表示为矢量 $(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in_1})$, 其中 x_{ij} 为 0-1 变量, $x_{ij}=1$ 表示订单 i 包含 SKU j , $x_{ij}=0$ 表示订单 i 不包含 SKU j 。因此, 所有 q_φ 个订单所包含 SKU 表示为矩阵 $\mathbf{X}$ 。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n_1} \\ x_{21} & & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ x_{q_\varphi 1} & \cdots & \cdots & x_{q_\varphi n_1} \end{pmatrix} \quad (16)$$

订单 i 和订单 j 之间的耦合度如式(17)所示

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{n_1} x_{ik} x_{jk} & i \neq j, i, j=1, 2, \dots, q_\varphi \\ 0 & i=j \end{cases} \quad (17)$$

因此, q_φ 个批量订单中两订单之间耦合度矩阵如矩阵 $\mathbf{A}$ 所示

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & \tau_{12} & \cdots & \tau_{1q_\varphi} \\ \tau_{21} & & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \tau_{q_\varphi 1} & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

基于以上推导, 可得各订单与其余订单的耦合度如式(19)所示

$$\tau_{i'} = \sum_{j=1}^{q_\varphi} \sum_{k=1}^{n_1} x_{ik} x_{jk}, i=1, 2, \dots, q_\varphi \quad (19)$$

最后, 计算当前订单与剩余订单 SKU 耦合度得到耦合度 $\tau_{i'}, i=1, 2, \dots, q_\varphi$, 将与其余订单耦合度之和即 $\tau_{i'}$ 最大的订单作为第一个拣选的订单即种子订单。因此, 确定种子订单为 $i=i^*$, 使得 $\tau_{i^*} = \max\{\tau_{i'} / i=1, 2, \dots, q_\varphi\}$ 。

(3) 确定伴随订单即除种子订单外的剩余订单的拣选顺序。

确定伴随订单方法如下。首先, 计算“四向车”在订单 i 所包含 SKU 储位与订单 j 所包含 SKU 储位之间移动所耗时长矩阵 T_{ij} 。第二步, 通过表上作业法计算“四向车”从订单 i 中 SKU 的储位到订单 j 中 SKU 的储位的总转换时间 T_{ij}' 及订单拣选顺序。第三步, 计算“四向车”拣选订单 i 和订单 j 时的出入库耗时 T_{ij}^* , 并取使 T_{ij}^* 最小的订单为下一拣选单。最后, 重复第三步, 直至确定所有订单拣选顺序。

在确定伴随订单第二步中, “四向车”转换时间 T_{ij}' 的表上作业计算流程具体如下。① 找到表 T_{ij} 中最小元素, 匹配订单 i 和订单 j 中当前两个 SKU, 如 $\min\{T_{ij}\} = T_{i_\alpha j_\beta}$, 则匹配订单 i 中第 α 个 SKU 和订单 j 中第 β 个 SKU, 作为订单 i 和 j 连续拣选的两个 SKU; ② 删除订单 i 和 j 中已确定匹配关系即确定连续拣选顺序的 SKU; ③ 继续寻找表 T_{ij} 中下一个最小元素, 匹配订单 i 和 j 下一组对应的两个 SKU, 作为订单 i 和 j 中下一组连续拣选的两个 SKU; ④ 重复以上步骤直至两订单中 SKU 拣选顺序全部确定; ⑤ 得到两订单 SKU 匹配关系和 SKU 拣选顺序 $\{i_1^* j_1^*, i_2^* j_2^*, \dots, i_{p_i}^* j_{p_j}^*\}$; ⑥ 因此, 可以得到“四向车”拣选订单 i 和订单 j 时在 SKU 储位之间的转换时间为 T_{ij}' 。

在确定伴随订单第三步中, 首先计算“四向车”拣选订单 i 和订单 j 时的出入库耗时 T_{ij}^* 。然后, 通过

改进的 SKU 储位耦合度模型计算剩余订单与当前订单的 SKU 储位耦合度即 $T_{ij}^* + T_{ij}'$, $j=1,2,\dots,q_\phi$, $j \neq i$ 。取与当前订单 SKU 储位耦合度最小的订单作为下一个拣选订单, 即订单 $j=j^*$, 使 $T_{ij}^* = \min\{T_{ij}^* / j=1,2,\dots,q_\phi, j \neq i\}$, 得到最终订单拣选顺序为 $\{V_1, V_2, \dots, V_{q_\phi}\}$ 。

4 数值算例

本文考虑“四向车”拣选系统中的拣选作业活动, SKU 数为 100, 巷道数, 层数, 列数依次为 5、5、4。订单缓存位为 2 个, 穿梭车数为 3 辆。“四向车”和提升机速度为 $v_2 = 5 \text{ m/s}$, $v_1 = 3 \text{ m/s}$, 分析并比较以下三种订单排序策略下的系统表现。

(1) S1, 顺序拣选, 对原始订单不做任何排序优化, 直接拣选。

(2) S2, SKU 耦合度算法, 即吴颖颖等^[18]所提出的基于两订单 SKU 耦合度进行订单排序的策略, 将批量订单按两两 SKU 耦合度大小排序。

(3) S3, 改进耦合度算法即本文所提算法, 将批量订单按所包含 SKU 储位耦合度进行排序。

4.1 三种排序策略在不同订单量下的拣选时间分析

本节考虑不同订单量情况下三种排序策略的表现。通过随机生成订单量依次为 10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 的订单, 分别计算三种订单排序策略下的订单拣选时间。为避免单次结果的偶然性, 重复进行 10 组计算并取平均值, 最后得到表 1 所示结果。三种订单排序策略下的订单拣选时间随着订单批量的增加逐渐增大, S1 策略即顺序拣选的订单拣选时间远高于 S2 和 S3 的订单拣选时间。同时, S3 下的出入库次数始终大于 S2, 但拣选时间始终小于 S2。通过比较两种策略下的订单完成时间差, 可知随着订单批量的增加, S3 相较于 S2 策略下 S3 策略下与 S2 策略下的订单完成时间差值逐渐增大, 当订单量为 90 时, 两种策略的差值为 518.7 s, 可见最低出入库次数并不能保证最短订单拣选时间。因此, 对于大批量订单的拣选来说, S3 相比较于 S2 和 S1 策略可以较好地缩短订单拣选时间。对于大型自动化仓库, 当日订单量达到千万级别时, 该策略可以大大缩短订单拣选时间, 提高系统拣选效率。S3 策略的出入库次数也保持较低水平, 与 S2 策略接近同时均优于 S1 策略。

表 1 不同订单量下三种排序策略的拣选时间

订单量/个	拣选时间/s			出入库次数/次		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
10	1 953.2	1 670.1	1 656.5	90	82	84
20	4 008.0	3 493.1	3 452.5	180	155	159
30	5 863.7	4 765.5	4 715.0	271	224	231
40	7 550.2	6 538.1	6 504.4	361	294	304
50	9 855.2	8 017.6	7 840.2	451	363	375
60	11 876.1	9 662.4	9 442.5	540	426	442
70	13 685.4	10 934.3	10 663.2	631	491	506
80	15 923.8	12 389.5	11 972.5	720	557	576
90	17 622.9	14 022.6	13 503.9	813	622	642
100	19 560.5	15 235.8	14 804.6	899	686	710

4.2 三种排序策略在不同订单结构下的拣选时间分析

本节考虑不同订单结构下三种订单排序策略的表现。依次随机策略生成 SKU 数为 10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 的订单, 计算三种策略下的订单拣选时间; 重复进行 10 次试验, 对 10 组结果取平均值, 得到结果如表 2 所示。S3 策略下订单拣选时间最短, S2 策略仍优于 S1 策略。但是随着订单 SKU 数的增加 S2 策略和 S1 策略的订单拣选时间差不断减小, S3 策略和 S2 策略的订单拣选时间差则趋于稳定。这是由于随着订单 SKU 数的增加两订单之间不耦合的 SKU 也逐渐增大, 耦合 SKU 数则相对减少, 所以单纯考虑耦合度无法较好地降低订单拣选

时间。

4.3 三种排序策略在不同“四向车”数量下的拣选时间比较

本节分析在“四向车”数量由 1 增加到 11 时, 三种策略下订单拣选时间变化如表 3 所示。无论“四向车”数量如何变化, S3 策略的订单拣选时间在三种策略中最短。同样 S2 策略也始终优于 S1 策略。当“四向车”数量增加到 9 个时, 三种策略的订单拣选时间趋于稳定, 不再发生变化。这是由于此时系统已经达到极限, 如果再继续增加“四向车”数量只会使增加的“四向车”闲置, 无法缩短拣选时间, 无法提高系统效率。同时, 出入库次数随着“四向车”数量的增加而减少, 但变化趋势较弱。

表 2 不同订单结构下三种排序策略的拣选时间

SKU 数/个	拣选时间/s			出入库次数/次		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
10	1 953.2	1 670.1	1 656.5	91	81	84
20	3 405.8	3 091.2	3 065.4	165	158	160
30	4 958.4	4 878.9	4 825.8	258	255	256
40	6 599.4	6 535.8	6 466.7	369	362	366
50	8 260.3	8 258.0	8 168.1	447	445	445
60	9 934.6	9 851.2	9 793.2	558	555	557
70	11 474.3	11 466.6	11 365.5	656	651	652
80	12 962.7	12 943.8	12 874.2	759	754	755
90	14 397.4	14 360.3	14 326.3	859	855	858
100	15 625.2	15 625.2	15 603.6	957	955	955

表 3 不同“四向车”数量下三种排序策略的拣选时间

“四向车”数/个	拣选时间/s			出入库次数/次		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
1	24 668.2	24 185.5	23 440.3	1 141	1 072	1 125
2	14 125.7	13 576.3	13 000.2	1 139	1 070	1 122
3	8 757.5	8 453.4	8 241.7	1 130	1 060	1 118
4	6 424.6	6 300.5	6 103.3	1 128	1 054	1 115
5	4 912.1	4 820.1	4 757.7	1 127	1 051	1 112
6	4 040.4	3 970.2	3 912.1	1 123	1 045	1 105
7	3 456.5	3 396.2	3 353.4	1 120	1 044	1 100
8	3 089.9	3 032.1	2 992.3	1 117	1 040	1 097
9	2 832.2	2 778.2	2 729.3	1 115	1 038	1 095
10	2 832.2	2 778.2	2 729.3	1 115	1 035	1 092
11	2 832.2	2 778.2	2 729.3	1 110	1 033	1 092

5 结论

(1) 本文建立了基于“四向车”拣选系统的订单排序模型，并提出基于贪婪算法的订单排序算法对模型进行求解。

(2) 相比较于顺序拣选和基于耦合度的订单拣选策略，本文所提策略可以有效降低订单拣选时间，提高系统效率。

(3) 对于不同订单结构和订单量该方法表现总是优于传统策略，鲁棒性较好。

参 考 文 献

[1] NOUDGADEMANN, DESTEEFVELDE. Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse[J]. IIE Transactions, 2005, 37(1): 63-75.

[2] PETERSEN C G , AASE G. A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking[J]. International Journal of Production Economics, 2004, 92(1): 11-19.

[3] HENN S, SCHMID V. Metaheuristics for order batching

and sequencing in manual order picking systems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 66(2): 338-351.

[4] HO Y C, SU T S, SHI Z B. Order-batching methods for an order-picking warehouse with two cross aisles[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 55(2): 321-347.

[5] LI J, HUANG R, DAI J B. Joint optimisation of order batching and picker routing in the online retailer's warehouse in China[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(2): 447-461.

[6] JANE C C, LAIH Y W. A clustering algorithm for item assignment in a synchronized zone order picking system[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 166(2): 489-496.

[7] RENE D K, LE-DUC T, ROODBERGEN K J. Design and control of warehouse order picking: a literature review[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 182(2): 481-501.

[8] HENN S. Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(11): 2549-2563.

- [9] MATTEWS J, VISAGIE S. Order sequencing on a unidirectional cyclical picking line[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 231(1): 79-87.
- [10] HENN S. Order batching and sequencing for the minimization of the total tardiness in picker-to-part warehouses[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2015, 27(1): 86-114.
- [11] 张贻弓, 吴耀华. 双拣选区自动分拣系统品项分配优化[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(11): 152-157.
ZHANG Yigong, WU Yaohua. Items assignment optimization for automated sorting system with double picking zones[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11): 152-157.
- [12] ZHANG Jun, WANG Xuping, CHAN F T S, et al. On-line order batching and sequencing problem with multiple pickers: A hybrid rule-based algorithm[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 45(1): 271-284.
- [13] ZHANG Jun, WANG Xuping, HUANG Kai. On-line scheduling of order picking and delivery with multiple zones and limited vehicle capacity[J]. *Omega*, 2017, 79: 104-115.
- [14] VALLE C A, BEASLEY J E, DA CUNHA A S. Optimally solving the joint order batching and picker routing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 262(3): 817-834.
- [15] BOYSEN N, BRISKORN D, EMDE S. Parts-to-picker based order processing in a rack-moving mobile robots environment[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 262(2): 550-562.
- [16] ŽULJ I, KRAMER S, SCHNEIDER M. A hybrid of adaptive large neighborhood search and tabu search for the order-batching problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 264(2): 403-796.
- [17] BAGRAMI B, AGHEZZAF E & LIMERE V. Enhancing the order picking process through a new storage assignment strategy in forward-reserve area[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, DOI: 10.1080/00207543.2019.1567953.
- [18] 吴颖颖, 孟祥旭, 王艳艳, 等. “货到人”拣选系统订单排序优化[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(4): 206-212.
WU Yingying, MENG Xiangxu, WANG Yanyan, et al. Order sequence optimization for “part-to-picker” order picking system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(4): 206-212.
-
- 作者简介: 田彬, 男, 1995 年出生。主要研究方向为自动化拣选系统, 物流系统调度与优化。
E-mail: christian_bin@mail.sdu.edu.cn
吴颖颖(通信作者), 女, 1985 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为自动拣选系统调度优化、物流系统规划、设计和仿真等。
E-mail: sophia.wu@sdu.edu.cn
吴耀华, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为自动分拣系统、集成化物流系统规划、设计, 仿真和物流技术装备等。
E-mail: yaohua.wu@sdu.edu.cn
曹伟洁, 女, 1993 年出生。主要研究方向为自动拣选系统, 多层穿梭车系统调度与优化。
E-mail: caoweijie1022@163.com