

基于荷兰式拍卖机制的 RMFS 货位指派研究

徐翔斌, 何世奇, 李秀

(华东交通大学 交通运输与物流学院, 南昌 330013)

摘要: **目的** 对移动机器人拣货系统(RMFS)的货位指派问题进行研究, 提出基于荷兰式拍卖机制的货位指派模型来提高 RMFS 的拣货效率。**方法** 构建荷兰式拍卖模型并按周转率对指定区域的 SKU 进行逐步调整, 以货位指派匹配度为期望指标, 实现 SKU 的需求模式与仓库存储结构之间的合理匹配。**结果** 通过与随机指派模型对比发现, 在不同仓库规模、需求偏度、订单规模等情况下, 基于荷兰式拍卖的货位指派方法可以使拣货路程下降 21.15%、工作时间平均下降 20.57%左右。**结论** 与传统指派方法相比, 提出的货位指派模型可以大幅度降低 RMFS 系统的拣货距离和时间, 大幅度提升在线零售企业的 RMFS 的拣货效率。

关键词: RMFS; 荷兰式拍卖机制; 货位指派; 任务分配; 调度优化

中图分类号: F274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)01-0128-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.01.020

RMFS Storage Location Assignment Based on Dutch Auction

XU Xiang-bin, HE Shi-qi, LI Xiu

(School of Transportation and Logistics, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: This paper aims to study storage location assignment of RMFS and propose an assignment mechanism model based on the Dutch auction strategy to improve the picking efficiency of RMFS. The Dutch auction model was established to gradually adjust the SKU of the designated area through the turnover rate to achieve a reasonable match between the demand model and the inventory structure of SKU, and assign matching degree as the expected index. Comparing with the random assignment model, it was found that the average picking distance of the picking route based on the Dutch auction under the condition of different warehouse size, demand skewness, order size, etc. decreased by 21.15%, and the working time decreased by an average of 20.57%. Compared with the traditional assignment method, the assignment mechanism model proposed in this paper significantly shorten the picking distance or time and greatly improve the picking efficiency of the RMFS of online retail enterprises.

KEY WORDS: RMFS; Dutch auction; storage location assignment; task assignment; scheduling optimization

移动机器人拣货系统(Robotic Mobile Fulfillment System, RMFS)作为一种新型“物至人”的订单拣选系统,相比传统“人至物”的拣货系统,其劳动强度低、效率高,并且可有效降低人为因素产生的误差。货位指派是商品(Stock keeping unit, SKU)入库后面临

的第一个问题,科学的货位指派能有效优化移动机器人的拣选效率^[1]。亚马逊等大型企业的 RMFS 系统普遍采用随机货位指派机制,该方法具有指派迅速和补货便捷等优点,但其在仓库中的作用并不能得到完全发挥^[2]。

收稿日期: 2019-07-25

基金项目: 江西省自然科学基金面上项目(20181BAB201010); 国家自然科学基金(71761013)

作者简介: 徐翔斌(1975—),男,博士,教授,主要研究方向为物流与供应链管理。

货位指派指将仓库中的商品分配到合适的货位，使订单分拣过程的行走距离最短，科学的货位指派方法可缩短行走距离，减少工作量，大幅度提高仓库拣货效率^[3]。为降低仓库货位分配成本，Huang 等^[4]提出，货位指派能够提高 RMFS 应对订单的需求多变与波动的能力，Weidinger 等^[5]研究了如何提升 RMFS 货位指派优化效率的问题，Roy 等^[6]则研究了移动机器人的存储区域分配机制，采用两阶段随机模型分析了多个移动机器人在不同订单规模下的拣选效率。Merschformann 等^[7]指出，RMFS 可以进行连续库存重新定位，可在拣选与补货同时进行货位优化，Boysen 等^[8]进一步指出将多种 SKU 存储在同一货架中，可以减少移动机器人数量。上述研究采用了多种分配方式来提升机器人的拣货效率，但未考虑在不同仓库结构、需求偏度、订单规模等影响因素下的拣选优化效果。

经济学中对资源分配的最好方式是采用拍卖机制，并且被运用于各种市场，而将拍卖机制应用于 RMFS 仓库的货位指派研究相对较少。荷兰式拍卖，也称为降价拍卖或反向时钟拍卖，是一种典型的资源分配方式。Adam 等^[9]对荷兰式拍卖在经济学中的招标研究应用进行了梳理，Guerci 等^[10]以易腐蚀商品市场为背景，采用荷兰式拍卖研究了连续市场的动态价格。Gillen 等^[11]则通过不同出价机制实验研究了反向多单元荷兰式拍卖，证实了荷兰式拍卖形式的重要性。Li 等^[12-13]提出将荷兰式拍卖模型构造成非线性

模型程序，并在竞价问题上进行了求解验证，这些研究表明荷兰式拍卖能够实现资源的高效和公平配置^[14]。RMFS 系统的货位指派本质上也是一个资源分配问题，鉴于此，文中提出荷兰式拍卖货位指派模型，针对不同仓库规模、需求偏度、订单规模的 RMFS 系统设计仿真实验，并依据周转率大小对 SKU 进行货位指派进行仿真^[15]，最后通过与传统随机指派方法进行对比分析，验证荷兰式货位指派的有效性。

1 问题描述及模型构建

1.1 问题描述

RMFS 的大部分工作由移动机器人完成，移动机器人每次只运送一个货架，根据系统指示进行订单拣选或仓库补货作业，其作业流程：系统首先按照货位指派机制将所有 SKU 分配到各存储货架，收到客户订单后，先将订单分配给相应的拣选站台，同时向移动机器人发布运输任务，移动机器人将存储订单 SKU 的目标货架从其存储位置搬运到指定的拣选站台，在 SKU 拣选过程中，拣选人员按照系统指示依次进行按灯拣选、扫描确认、按灯存放作业，完成 SKU 拣选后，移动机器人将货架送回存储区存储。RMFS 的整个作业流程见图 1，其中货位指派直接影响到后续流程，是 RMFS 拣货系统高效运行的关键。

以单区仓库为研究对象，即仓库有若干排并列摆放的单层货架，仓库的基本布局见图 2，其中拣货路

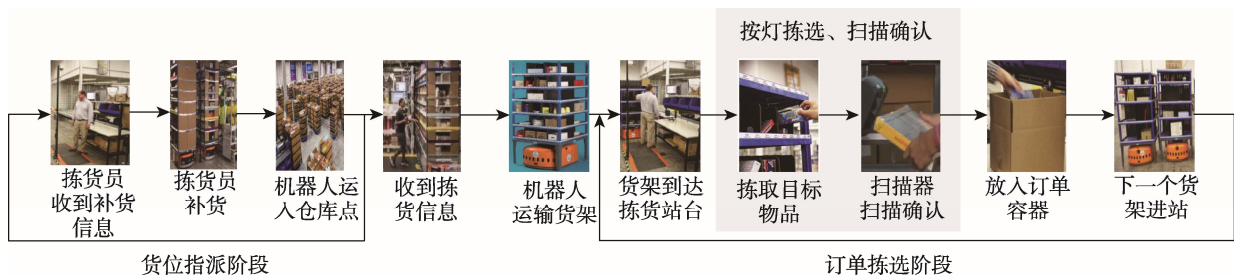


图 1 RMFS 作业流程
Fig.1 RMFS operation process

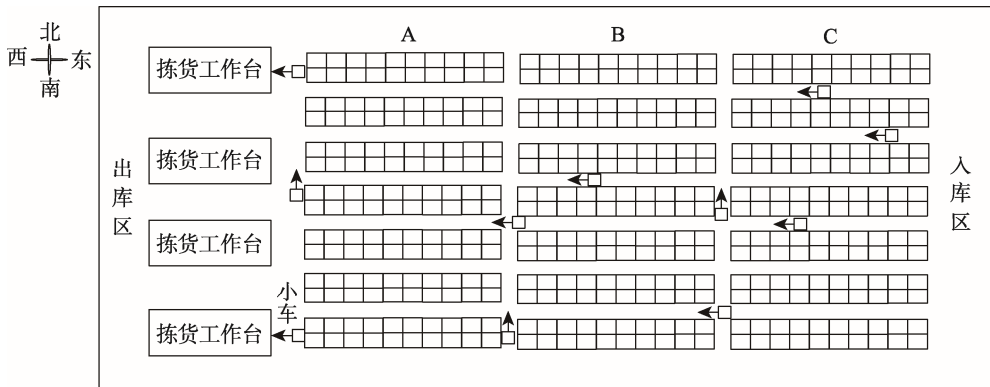


图 2 RMFS 仓库示意
Fig.2 RMFS system warehouse diagram

径由2条南北方向巷道与6条东西方向巷道组成,每条巷道横穿所有货架。将仓库分为A,B,C等3个区域,离出口最近的区域A为高周转率区域,B区域次之,C区域处于低周转率区,3个区域的面积大致相同。

1.2 模型构建

模型假设:所有拣货巷道内的货架数量相同,不考虑作业人员拣货时间和移动机器人等待时间;移动机器人每次只能运送1个货架,无拣货冲突;每种SKU只能被指派到1个货位,每个货位只能存放1种SKU;货架为单层货架,承重能力相同。模型参数设定如下: R 为移动机器人,编号为 $r=1,2,\dots,R$; K 为SKU种类,编号为 $k=1,2,\dots,K$; F 为货架数,编号为 $f=1,2,\dots,F$; L 为南北方向巷道的总数,编号为 $l=1,2,\dots,L$; L_r 为移动机器人运行数量; v 为移动机器人运行速度; S 为拣选总路程; G_{rl} 为移动机器人拣选 r 号订单是否经过巷道 l ,经过为1,不经过为0; x_{ljk} 编号为 k 的SKU是否存储于第 l 号巷道内的第 f 个货位,存储于货位为1,否则为0; M 为货位数,编号为 $m=1,2,\dots,M$; T_s 为待指派区域的最低周转率; H 为SKU的周转率; N 为待指派的区域数量,编号为 $n=1,2,\dots,N$; Q 为已指派区域, $q=1,2,\dots,Q$; $E(\cdot)$ 为货位指派匹配度; $F(\cdot)$ 最低货位周转率标准累积函数。

目标函数为:

$$S = \min \sum_{r=1}^N S_r \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{f=1}^F x_{ljk} = 1, \forall k \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ljk} \leq 1; \forall l, f \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^L G_{rl} \geq 1; \forall r \quad (4)$$

$$G_{rl}, x_{ljk} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$v \geq 0, L_r \geq 1 \quad (6)$$

式(1)表示货位优化的目标函数,目的是使得所有订单拣选总路程最短;式(2)表示每一种SKU只能存放于一个货架;式(3)表示每一个货位只能存放一种SKU;式(4)表示每一个移动机器人至少访问一条巷道;式(5)和式(6)是参数、变量的取值范围。

2 荷兰式货位指派机制

荷兰式拍卖,也称降价拍卖或反向时钟拍卖。首先商品进入拍卖市场,并按照交易队列开始拍卖,然后卖方提出初始报价,当一段时间内没有买方应价或

加价,说明买方对商品的预期价格低于卖方的初始报价,卖方则将依据相应的降价机制对初始报价进行调整,直到卖方应价;若到达卖方最低期望值时,仍无买方回应价格,交易流拍,进行下一阶段的商品拍卖;当报价低于或者等于买方的预期时,则买方应价,协议达成。具体拍卖过程见图3。

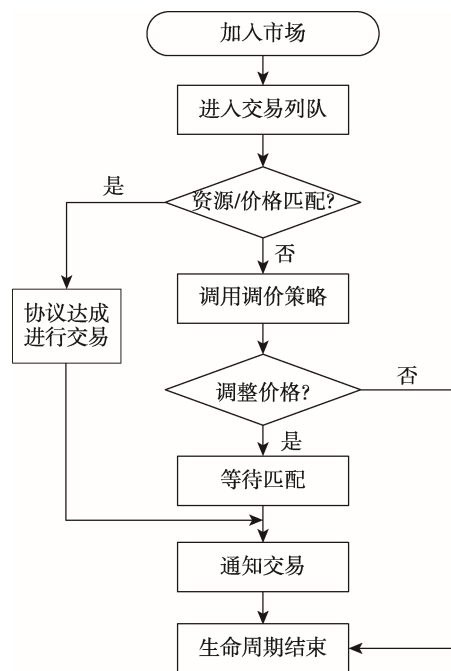


图3 荷兰式拍卖流程

Fig.3 Process of Dutch auction

货位指派是将商品分配到仓库中合适的货位^[2],也是一种资源分配问题,拍卖机制是经济学中对资源分配的最好方式之一,可以通过设计合理拍卖机制,实现RMFS商品和货架的最优的匹配,从而提升RMFS的拣货效率。文中研究的基于荷兰式拍卖的货位指派决策是一个离散的拍卖过程,来提升待指派区域货位数量与SKU种类数量之间的匹配成功率,从而降低移动机器人拣货过程中的工作时间及行走路程。首先假设仓库在货位分区时SKU的周转率已知,且任何待指派区域不受其他区域 T_s (卖方)的影响,将待指派的SKU视为荷兰式拍卖中的买方,其周转率视为价格,待指派区域视为卖方,在货位指派之前首先将SKU随机指派至任意货架上,然后随着 H 下降至 H_k ,对相应周转率的SKU进行重新指派,直至待指派区域的空储位数量与需指派的SKU种类数量匹配,从而将SKU指派至相应的区域,完成指派,具体过程见图4。

基于荷兰式拍卖的RMFS货位指派机制如下所述。

1) 计算仓库中所有SKU的周转率。

2) 将SKU随机指派至任意货架上,仓库的货位序号按 s 形排列,有 M 个货位, F 个货架,分成 n 个待指派区域,视为 $n(n \geq 1)$ 个拍卖者。

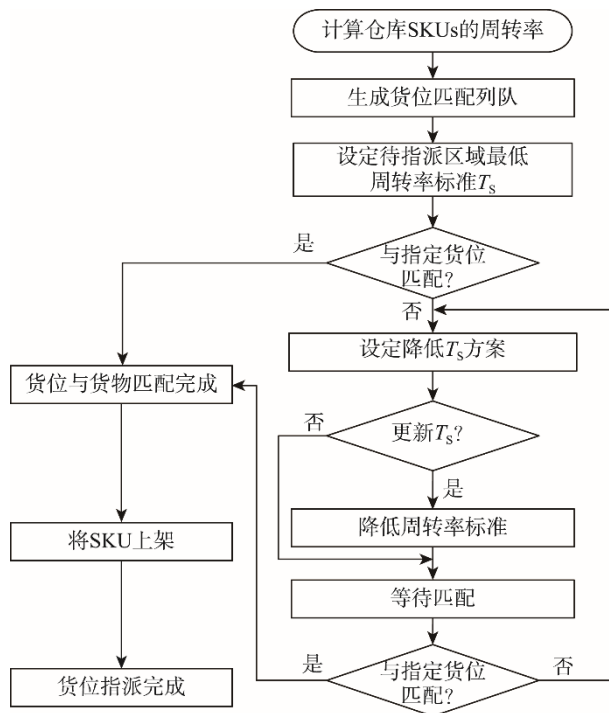


图 4 荷兰式拍卖机制指派过程

Fig.4 Process of Dutch auction assignment mechanism

3) 随机生成数量为 5, 10, 15 个 SKU 的 3 种不同规模订单。

4) 按照上一步骤中生成的随机订单, 仿真计算出拣选完所有订单后移动机器人需要行走的总路程, 在此基础上计算出移动机器人拣选所有订单 SKU 所需要的拣货路程。

5) 根据 SKU 的周转率对仓库进行货位指派, 过程如下:

① 将所有 SKU 的周转率从低至高设置为 k 个 H , 其中 $H_k < \dots < H_2 < H_1$ 。

② 假设仓库内 $M_1 \sim M_m$ 号货位上的货架(待指派区域)需要摆放为满足 T_s 以上的 SKU, 若 SKU 的周转率达到与货位匹配的要求, 则将周转率为 T_s 以上的 SKU 依次指派到 $M_1 \sim M_m$ 号货位上。

③ 若待指派货位中周转率为 T_s 以上的 SKU 数量没有达到 M_m , 则逐步增加相应周转率标准至 H_1 , 直至区域内需指派 SKU 的货位数量恰好与周转率为 T_s 的 SKU 相同时, 将 SKU 依次指派至相应的货位。

④ 当待指派货位数量不满足于 SKU 数量时, 则将 SKU 按照 $H_1, H_2, \dots, H_k$ 降低, 直至达到 H_k 时, q (已指派区域) 的 T_s 恰好都高于 H_k , 再将 SKU 指派至 $n - q$ (待指派区域) 的相应货位。

⑤ 按照步骤②—④的调整方法, 对剩下的货位进行指派, 当仓库内的 n 全部存储匹配的 SKU 时, 整个过程结束。

6) 货位指派完成以后, 系统依次生成所有待拣选的订单, 并得到移动机器人的总拣选路程 S 。

在上述荷兰式拍卖的货位指派过程中, 当 $q \geq 1$ 时待指派货位区域的 T_s 不在 $[H_k, H_1]$ 的范围内, 并且该区域内 T_s 大于 H_1 时, 没有达到标准, 那么将其余待指派区域 T_s 估值降低至 $[H_k, H_1]$ 范围内。当在 $[H_k, H_1]$ 范围内的待指派区域只有一个满足匹配需求时, 则其余的 $n - q$ 个待指派区域必须按照荷兰式指派机制重新指派。

荷兰式拍卖货位指派机制中的期望定义 $E(H_i)$ 为待指派区域中 H_i 的匹配成功概率, 具体计算式为:

$$E(H_k) = \sum_{q=1}^n \binom{n}{q} F(H_k)^{n-q} [F(H_{k+1}) - F(H_k)]^q =$$

$$\sum_{q=0}^n \binom{n}{q} F(H_k)^{n-q} [F(H_{k+1}) - F(H_k)]^q - F(H_k)^n =$$

$$F(H_{k+1})^n - F(H_k)^n \quad (7)$$

式中: $F(\cdot)$ 为最低货位周转率标准累积函数。

3 仿真实验

3.1 实验因子及参数

荷兰式货位指派中待指派区域的货位数量与 SKU 能否成功匹配, 与仓库尺寸的大小、客户订单数量、指派后目标 SKU 的位置以及订单的偏度密切相关, 货位指派相关影响因素的实验因子及其水平见表 1, 采用 3 种不同规模大小的仓库, 分别为 560 个货位的小型仓库、900 个货位的中型仓库、1320 个货位的大型仓库; 需求偏度则依据帕累托法则, 分为高、中、低 3 种水平, 分别表示为 20% SKU 种类产生 80%, 70%, 50% 的订单需求; 订单规模则为平均每个订单包含 5, 10, 15 个 SKU 的 3 种规模。通过上述不同因子水平的组合可以产生 $3 \times 3 \times 3$ 种实验场景, 在不同实验场景下采用荷兰式货位指派机制的仿真实验分析优化效率结果, 应用 SPSS21.0 对不同实验场景下的因子进行全方差分析, 当因子间的显著性水平高于 (Sig.) 0.05 时, 表明该因子与多个因子之间的相互影响性较弱, 当 F 值越小时, 其因子之间的相互影响越小, 见表 2。表 2 中 F 值最大的相关因子为订单规模与需求偏度, 说明这 2 个因子对货位指派优化影响效果较大。

表 1 实验因子及水平
Tab.1 Experimental factor and level

因子	水平
订单规模 U	5, 10, 15
调整机制 V	荷兰式拍卖
需求偏度 W	高, 中, 低
仓库规模 X	大, 中, 小

表 2 因子间描述性统计
Tab.2 Descriptive statistics among factors

Source	Type III square sum	df	Mean square	F	Sig.
Correction model	176.786 ^a	53	3.336	7.813	0.000
X	8.320	2	4.160	9.745	0.000
U	2.991	2	1.495	3.503	0.032
W	68.688	2	34.344	80.447	0.000
V	1.361	1	1.361	3.187	0.076
X * U	10.656	4	2.664	6.240	0.000
X * W	24.647	4	6.162	14.433	0.000
X * V	0.704	2	0.352	0.824	0.440
U * W	1.467	4	0.367	0.859	0.489
U * V	13.720	2	6.860	16.069	0.000
W * V	0.487	2	0.244	0.571	0.566
X * U * W	4.555	8	0.569	1.334	0.228
X * U * V	2.457	4	0.614	1.439	0.222
X * W * V	18.232	4	4.558	10.676	0.000
U * W * V	13.027	4	3.257	7.629	0.000
X * U * W * V	5.474	8	0.684	1.603	0.125
Error	92.214	216	0.427		

注：X*U 表示同时考虑仓库规模与订单规模

3.2 实验结果对比

采用荷兰式拍卖机制进行货位指派,让移动机器人根据不同仓库规模、需求偏度、订单规模的实验场景进行订单拣选,运用 Matlab 软件对荷兰式拍卖模型进行仿真求解,然后对比仓库指派前后移动机器人所需要的拣选路程与工作时间,结果见图 5。

纵坐标为荷兰式货位指派后拣货距离与工作时间的下降比率,横坐标为仓库规模。

由图 5 可以看出,应用荷兰式货位指派进行货位指派,移动机器人的拣货路程最多下降了 21.15%,工作时间平均下降了 20.57%,货位优化效果非常明显。不同需求偏度下的货位指派优化效果见图 6,可以看出在需求偏度较大时,其货位优化效果十分明显,在需求偏度较高时,中型仓库则平均下降了

25.95%,说明在需求偏度较高时,中型仓库内更适合应用荷兰式货位指派机制。

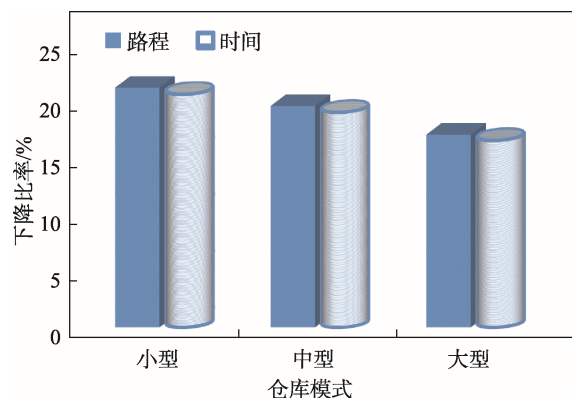


图 5 货位指派后拣货距离与工作时间下降比率
Fig.5 Picking distance and working time reduction ratio after storage location assignment

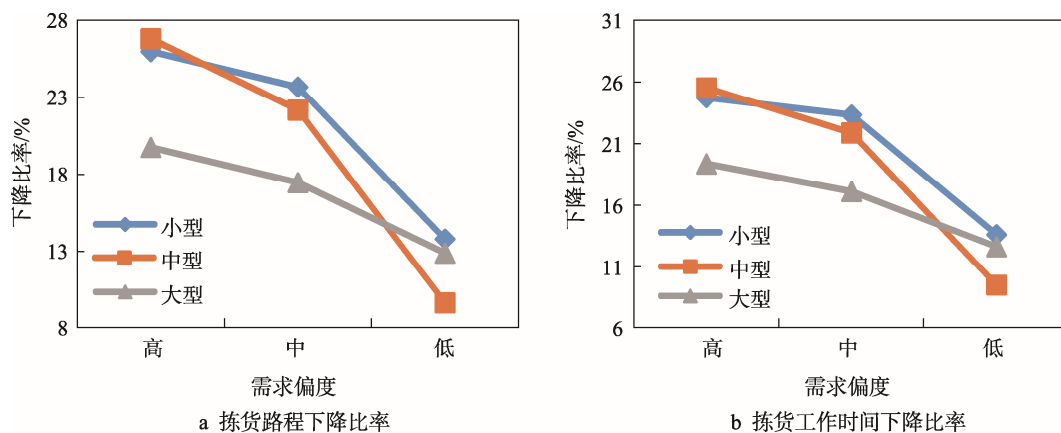


图 6 不同需求偏度下指派后拣货路程与工作时间下降比率

Fig.6 Picking distance and working time reduction ratio after different demand skewness

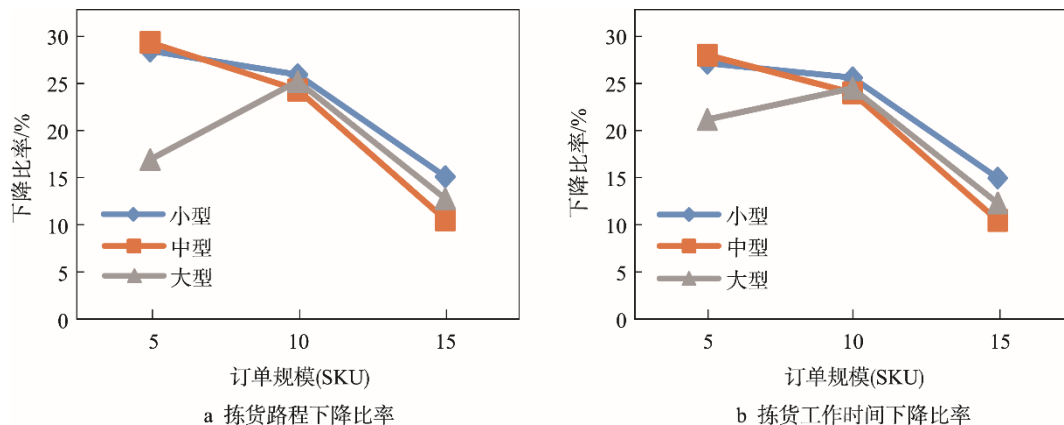


图 7 不同订单规模调整后拣货距离与工作时间下降比率

Fig.7 Picking distance and working time reduction ratio after different order size adjustment

不同订单规模下的货位指派优化效果见图 7,可以看出,当订单规模由 5 个 SKU 上升至 15 个 SKU 时,中小型仓库中移动机器人的拣货行走路径与工作效率呈现下降趋势,特别需要指出的是当订单规模为 10 个 SKU 时,在大型仓库中拣货效率优化效果最好。

可见,采用荷兰式拍卖货位指派机制之后,移动机器人拣货行走的路程与工作时间都有所下降,并且特别适合对平均订单规模偏小以及需求偏度较高的 RMFS 进行货位指派。

4 结语

研究的荷兰式拍卖货位指派机制可以适应不同仓库规模、订单规模与需求偏度的货位指派,能有效提升移动机器人拣选订单的效率,由于在线零售企业的需求普遍具有订单规模偏小以及需求偏度较高的特点,该方法能够大幅度提升在线零售企业的 RMFS 的拣货效率。

参考文献:

- [1] DE KOSTER R, 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.
- [2] LAMBALLAIS T, ROY D, DE KOSTER M B M. Estimating Performance in a Robotic Mobile Fulfillment System[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 256(3): 976—990.
- [3] 徐翔斌, 李秀. 固定路径下多阶段货位调整研究[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(5): 24—31.
XU Xiang-bin, LI Xiu. Research on Route-based Multi-staged Storage Location Adjustment[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2017, 22(5): 24—31.
- [4] HUANG G Q, CHEN M Z Q, PAN J. Robotics in Ecommerce Logistics[J]. *HKIE Transactions*, 2015, 22(2): 68—77.
- [5] WEIDINGER F, BOYSEN N, BRISKORN D. Storage Assignment with Rack-moving Mobile Robots in KIVA Warehouses[J]. *Transportation Science*, 2018, 52(6): 1479—1495.
- [6] ROY D, NIGAM S, DE KOSTER R, et al. Robot-storage Zone Assignment Strategies in Mobile Fulfillment Systems[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 122: 119—142.
- [7] MERSCHFORMANN M. Active Repositioning of Storage Units in Robotic Mobile Fulfillment Systems[M]//*Operations Research Proceedings 2017*. Springer, Cham, 2018: 379—385.
- [8] BOYSEN N, BRISKORN D, EMDE S. Sequencing of Picking Orders in Mobile Rack Warehouses[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 259(1): 293—307.
- [9] ADAM M T P, EIDELS A, LUX E, et al. Bidding Behavior in Dutch Auctions: Insights from a Structured Literature Review[J]. *International Journal of Electronic Commerce*, 2017, 21(3): 363—397.
- [10] GUERCI E, KIRMAN A, MOULET S. Learning to Bid in Sequential Dutch Auctions[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2014, 48: 374—393.
- [11] GILLEN P, RASCH A, WAMBACH A, et al. Bid Pooling in Reverse Multi-unit Dutch Auctions: An Experimental Investigation[J]. *Theory and Decision*, 2016, 81(4): 511—534.
- [12] LI Z, KUO C C. Revenue-maximizing Dutch Auctions with Discrete Bid Levels[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 215(3): 721—729.
- [13] LI Z, KUO C C. Design of Discrete Dutch Auctions with an Uncertain Number of Bidders[J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 211(1): 255—272.
- [14] Van Den BERG G J, Van OORS J C, PRADHAN M P. The Declining Price Anomaly in Dutch Dutch Rose Auctions[J]. *American Economic Review*, 2001, 91(4): 1055—1062.
- [15] 徐翔斌, 李秀. 基于数据挖掘的动态货位指派系统[J]. *包装工程*, 2017, 38(19): 128—132.
XU Xiang-bin, LI Xiu. Data Mining-based Dynamic Storage Location Assignment System[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(19): 128—132.