

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2025.07.008

智能接力拣选系统储位分配问题研究及应用^①

张大力^{1,2}, 赵思翔^{1,2*}, 宋爽¹, 蒋振辉³, 肖勇民³

(1. 上海交通大学安泰经济与管理学院, 中美物流研究院, 上海 200030; 2. 上海交通大学
数字化管理决策实验室, 上海 200030; 3. 上海发网供应链管理有限公司, 上海 200443)

摘要: 本研究提出了一种应用于前置拣选区域的智能接力拣选系统以及配套的储位分配算法, 以解决电商平台的订单分拣问题。本研究介绍了该系统化解决方案的设计思路及理念, 以及其配套储位分配算法的核心思想, 并采用企业实际数据验证了模型与算法的有效性。目前本算法已用于上海发网供应链管理有限公司(简称“发网”)拣选线的线边储位优化, 结合硬件设备实现了一类商业化的智能拣选产品, 显著提升了订单分拣的效率。算法的提出尤其解决了我国电商行业在电商大促期间的人力需求激增而产生的“用工荒”等一系列问题。

关键词: 电商物流; 智能接力拣选系统; 储位分配; 应用研究

中图分类号: C939 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2025)07-0131-05

0 引言

近年来, 电商的快速发展极大地影响了仓储物流的管理与运作模式。电商仓储相对于传统企业的仓储管理具有如下显著的特点: 电商订单批量小, SKU(stock keeping unit)品类多、组合丰富, 交期紧^[1]。为实现订单的快速分拣, 一种常见的解决方案是将仓库域划分为存储区与前置拣选区, 存储区采用高密度货架存储SKU, 并即时为前置拣选区补货。前置拣选区通常占地面积有限, 采用易于拿取的低密度存储设备(如重力货架)。前置拣选区的分拣方式可通过“人到货”的方式, 或是自动化的“货到人”分拣系统^[2-4]。在“人到货”的拣选方式中, 接力拣选系统被广泛应用在中小体积商品, 如美妆、医药、日用品等的分拣中^[5]。

在订单分拣过程中, SKU的储位布置将直接影响分拣效率。然而, 受平台促销活动及直播带货

等新兴模式的影响, 商品的热度会随着时间发生显著改变, 也给储位的合理布置带来了新的管理挑战。以发网某类商品订单“双十一”数据为例, 11月1日订单中部分高需求的SKU在11日的订单中需求为0。上述问题特点对前置拣选区的储位布置算法的即时性与有效性, 以及分拣系统的柔性提出了更高的要求。

1 智能接力拣选系统解决方案

发网联合上海交通大学中美物流研究院团队成立智能算法联合研究中心, 并以项目制的形式孵化能够助力解决我国电商物流行业痛点的产品。针对上述问题, 该中心共同研发了一种智能接力分拣系统解决方案, 通过算法赋能及储位的快速换线调整, 应对小批量多品种的订单分拣模式。

为实现上述目标, 本研究提出了一种前置存储区智能接力拣选系统。该系统通过传送装置连

① 收稿日期: 2023-01-31; 修订日期: 2023-06-28。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72071128, 72001141); 国家自然科学基金资助重大研究计划项目(72192822); 上海交通大学行业研究院资助项目(YY2131)。

通讯作者: 赵思翔(1990—), 男, 广西贵港人, 博士, 副研究员, 博士生导师。Email: sixiang_zhao@sjtu.edu.cn

接不同的拣选分区,每个分区采用低密度货架储存一定品类的 SKU,并通过高位货架对储位进行实时补货. 每个到达的订单被分配至一个托盘,托盘根据分区 SKU 布局情况,通过预先设置的移动路径依次经过拣选分区. 分区内的拣选人员在接收到托盘后,结合手持终端及视觉辅助系统,将该订单所包含的 SKU 拣选至托盘内,并将托盘移至传送带,使其继续向下游移动,直至订单中所有的 SKU 均被分拣完毕. 系统的物理结构如图 1 所示.

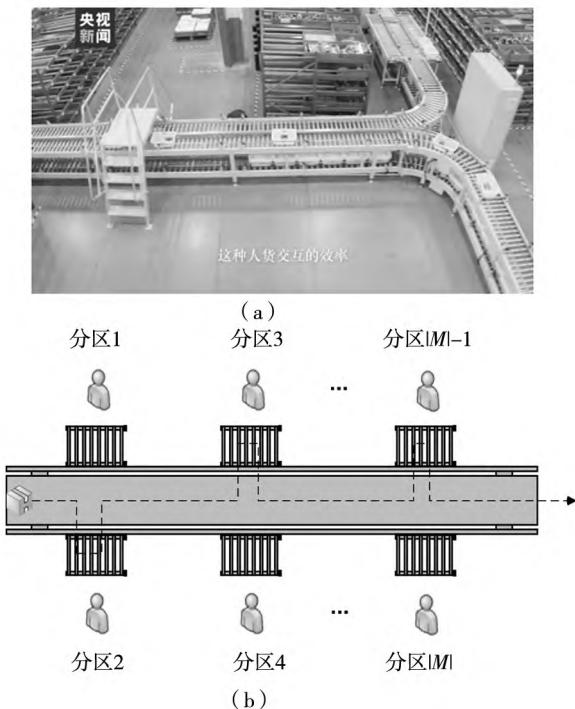


图 1 (a) 央视新闻报道的发网智能分拣系统以及
(b) 对称式分区分拣系统结构图

Fig. 1 (a) The intelligent pick-and-pass system reported by CCTV
(b) the symmetric structure of the system

该智能接力拣选系统在企业整体信息系统中的位置以及与其它子系统的关联关系如图 2 所示.

与传统的接力拣选系统不同,上述接力拣选系统具有如下特点. 首先,拣选分区占地面较小,因此分拣人员在分区内的移动距离可忽略,故系统的目标是最大化该分拣系统的订单满足率. 其次,在工程应用中,为提高场地利用率,拣选分区可能是部分连通,且分区可存储 SKU 的品类有限,一定程度上也增加了储位布置问题的复杂度.

最后,电商环境下的订单特点也对求解算法提出了更高要求:一方面,现代电商中订单数量及 SKU 品类规模较大,导致问题规模大而难以求解;另一方面,由于 SKU 热度的变化导致订单的不确定性,要求算法能在较短时间内根据截单数据给出高质量的储位布置方案,给现场管理人员预留充足的时间安排储位调整;SKU 的长尾效应也给分拣系统的作业平衡带来挑战.

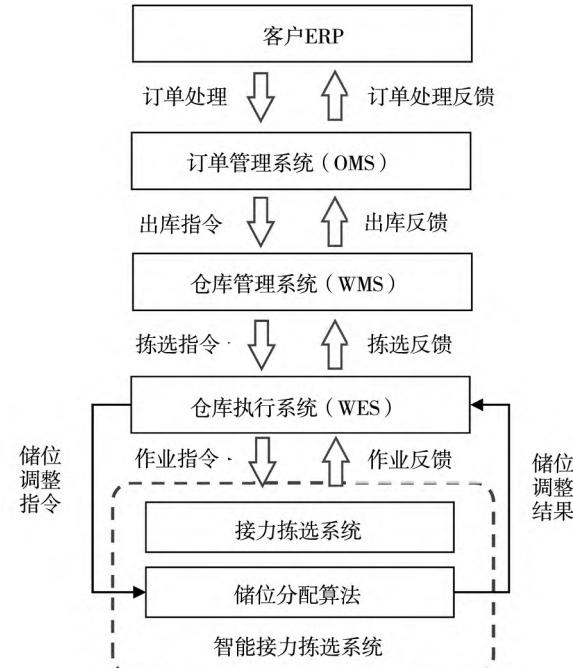


图 2 系统架构示意图

Fig. 2 Illustration of the system architecture

2 智能接力拣选系统储位分配模型及求解算法

针对上述系统,本团队结合生产实际的需求,对智能接力拣选系统的储位初始上架问题,以及考虑线平衡与换线调整的问题展开研究,并设计有效求解算法.

2.1 初始上架储位分配模型及求解算法

本研究对初始上架储位分配模型进行建模. 在实际应用中,企业可通过截单的方式(如截取每日凌晨 2 点前所收到的系统订单,并于 8 点前将储位调整完毕并进行分拣)确定当前待拣选订单,从而将该问题转化为一个确定型优化问题. 本研究首先针对该问题建立了一个混合整数规划模

型. 由于该模型当问题规模增大时难以直接采用求解器求解,为此,本研究首先分析发现模型具有如下特性:1) 订单占优关系:若订单 k_1 中的 SKU 集合是订单 k_2 的父集合,则若订单 k_2 无法被拣选,那么订单 k_1 也无法被拣选;2) SKU 占优关系:若包含 SKU i_1 的订单集合是包含 SKU i_2 的订单集合的子集,则若 SKU i_1 不被拣选,那么 SKU i_2 也不会被拣选. 根据上述特性,可设计有效不等式,缩小解空间,从而加速原模型的求解过程. 采用中小规模的日订单数据(4 000 种订单,500 种 SKU)测试发现,在相同计算时间下,添加有效不等式求解得到的布置方案的订单满足率较未添加不等式得到的方案提升约 20%.

2.2 考虑平衡及换线约束的拓展模型及求解算法

第 3.1 小节所述方法虽然可加快算法的收敛速度并求解到全局最优解,但当问题规模增大时,直接求解不可行. 不仅如此,在实际应用中,由于订单的长尾效应,分区间可能会存在作业不平衡的问题. 除此之外,初始上架模型并未考虑储位更改数量的限制,若现场每天调整 SKU 储位数量过多,不仅会增加现场储位调整的工作量,也会为项目推行带来阻力.

为此,本研究设计了一种基于 SKU 权重的启发式算法,在保证求解效率的基础上,充分考虑分拣过程的换线约束及作业平衡问题. 该权重的计算方式可理解为,若某类订单需求量大且所包含的 SKU 品类较少,那么可认为该类订单的单位收益较高,应优先通过分拣系统满足. 相反,若某类订单所包含的 SKU 品类较多,则所需分配的储位数量也会增加,在储位容量有限的前提下,会增加订单的满足难度,因此该订单的权重也相应减少. SKU 权重通过对每个 SKU 品类所涉及的订单权重的求和计算而得. 上述启发式算法可以在分钟级的求解时间(≤ 5 min)求解较大规模(2 万种订单,500 种 SKU)的问题,已能达到中小规模仓库的运营需求;针对更大规模的问题,算法效率可通过工程化手段进一步优化提升.

2.3 案例研究

本研究采用发网“双十一”订单数据,以及某仓库的 6 分拣区拣选系统,验证所设计方法的有

效性. 由于实际运营环境中受多种不确定因素影响,仅采用每天的截单数据,以滚动决策的方式,对不同储位调整策略下订单拣选率的变化情况进行回测(见图 3(a)). 其中,策略 1 可视为理想情况,即每天清空现有储位并做初始上架布置,在实际应用中会产生极大的储位调整成本. 策略 2 与策略 3 类似,均为初始上架之后,每天最多调整不超过 60 个 SKU,其中策略 3 针对性地增加了“双十一”大促当天的可调整 SKU 数量,提升为 180 个. 策略 4 作为对比策略,即初始上架之后不根据 SKU 热度变化做储位调整. 四种策略第一天订单分拣率均为 90%. 但随着时间推移,SKU 的热度也发生变化,策略 4 在“双十一”当天订单分拣率仅为 56.4%,较之第一天分拣率大幅下降. 相对应的,策略 1 通过初始上架方式,分拣率可达 84%. 策略 2 与策略 3 分拣率变化不大,但由于策略 3 在“双十一”当天增加了可调整 SKU 储位数量,其分拣率相较于策略 2 也得到大幅提升,达到了 79.0%,仅比策略 1 低 5%,因此策略 3 为更理想的策略. 分区作业平衡结果如图 3(b)所示,可见该储位布置算法可有效平衡分拣分区的作业量.

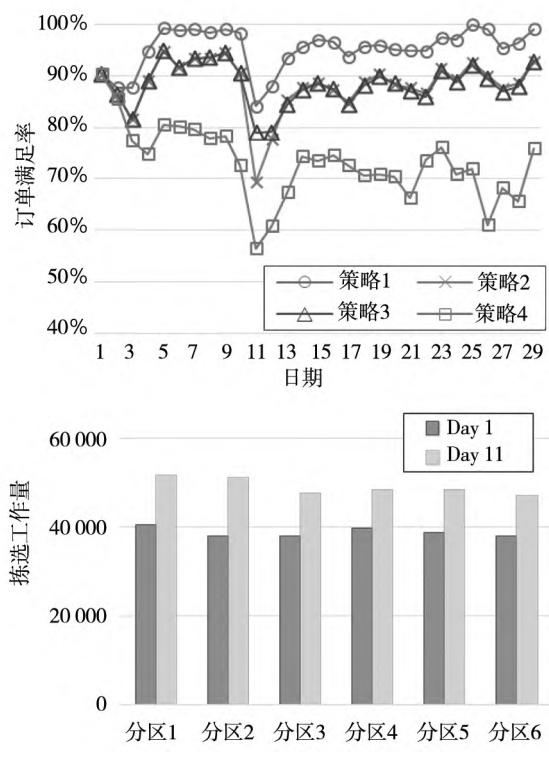


图 3 算法效果展示

Fig. 3 The performance of the algorithm

3 方法总结及企业应用效益

在硬件层面,项目团队针对所研发系统对比了市场上多种主流的分拣方式,包括人工拣选、AGV (automated guided vehicle) 货到人拣选系统等。智能接力拣选系统在分拣效率上要远优于人工拣选方式。相较于 AGV 拣选而言,智能接力拣选系统也具有如下优势:1)资金投入较少;2)单位占地面积分拣效率更高;3)对地面平整度要求较低,可扩展性强;4)更适用于 SKU 数量种类较少(1 000 以内)而单量较大的场景。因此,智能接力拣选系统可适用场景更广,尤其适用于包含众多中小规模仓库的现代物流“云仓”体系^[6]。

在算法方面,本研究所提出的启发式算法不依赖于分拣系统的具体物理结构,因此可拓展至更具一般化的接力拣选系统中。本研究所提出的启发式方法具有求解速度快,可有效满足企业在订单规模较大的情况下实时决策的需求。同时,算法的可解释性强,更容易被企业决策者所接受,进而在企业中得到进一步推广。除此之外,未来可将硬件设备及配套算法产品化,通过算法及数据可视化的赋能,实现包括订单分配、初始上架、储位调整等一系列功能,为企业的智能决策提供辅助,提升企业订单分拣效率及行业竞争力。

智能分拣系统及其配套算法为企业带来的效

益,可以分为人力成本节省与产品销售盈利两个部分:首先以“双十一”期间工作量估计,可为发网单仓节省人力投入约 400 人/天。根据“双十一”期间外包人力成本及招聘成本计算,节约成本近 30 万/天/仓库。2020 年“双十一”后,上海发网已将该系统与配套算法推广至广州和成都仓库,功效数据表明在日常电商订单分拣过程中可以为三个仓库节约 200 人至 300 人,节约人工成本保守估计达 2 000 万元/年。目前整套系统及配套算法正在至少 20 个发网自营仓库中进一步推广,并在未来以租赁和销售的模式将整套解决方案推广至 50 个发网云仓中。预期可节约企业内部人力资源成本约 4 000 万元/年,并通过系统的租赁和销售额外产生约 2 000 万元/年的利润。该方法的提出尤其解决了我国电商行业在电商大促等关键时间点的人力需求激增产生的“招工难”问题。所获成果也于 2021 年 3 月 12 日获得中央电视台《央视新闻》栏目报道(见图 1(a))。

4 结束语

本研究提出了一种智能接力拣选系统以及配套的储位分配算法,并通过发网供应链的实证研究验证了其提升分拣效率、缓解大促用工压力的实际价值。系统融合算法优化与硬件协同,形成可复用的智能仓储解决方案,为电商物流降本增效提供新范式。

参 考 文 献:

- [1] Boysen N, De Koster R, Weidinger F. Warehousing in the e-commerce era: A survey [J]. European Journal of Operational Research, 2019, 277(2): 396–411.
- [2] Jiang M, Leung K H, Lyu Z, et al. Picking-replenishment synchronization for robotic forward-reserve warehouses [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 144: 102138.
- [3] Wu W, De Koster R B M, Yu Y. Forward-reserve storage strategies with order picking: When do they pay off? [J]. IIE Transactions, 2020, 52(9): 961–976.
- [4] 庄燕玲, 孙玉姣, 朱 涛, 等. 移动货架系统多机器人“存-取货架”调度优化方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(2): 488–508.
Zhuang Yanling, Sun Yujiao, Zhu Tao, et al. Multi-robot scheduling problem of robotic mobile fulfillment systems: An a-

daptive matheuristic [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2023, 43(2): 488 – 508. (in Chinese)

[5] Pan J C H, Shih P H, Wu M H, et al. A storage assignment heuristic method based on genetic algorithm for a pick-and-pass warehousing system [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 81: 1 – 13.

[6] 陈良勇. 快消品“云仓+供应链整合”新盈利模式研究 [J]. 商业经济研究, 2019, (5): 91 – 93.

Chen Liangyong. Research on the new profit model of “cloud warehouse + supply chain integration” for fast moving consumer goods [J]. Journal of Commercial Economics, 2019, (5): 91 – 93. (in Chinese)

Storage assignment problem for an intelligent pick-and-pass system: Algorithms and applications

ZHANG Da-li^{1, 2}, ZHAO Si-xiang^{1, 2*}, SONG Shuang¹, JIANG Zhen-hui³, XIAO Yong-min³

1. Sino-US Global Logistics Institute, Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
2. Data-Driven Management Decision Making Lab, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
3. FineEx Supply Chain Management Co. Ltd., Shanghai 200443, China

Abstract: This study proposes an intelligent pick-and-pass system and a storage assignment algorithm to improve order-picking operations in e-commerce warehouses. In this paper, the structure of the pick-and-pass system and the idea of the algorithm are presented. The algorithm has been applied to the line-side storage optimization of the picking line at FineEx, a supply chain management firm in Shanghai, and its effectiveness has been verified using the real data from FineEx. Combined with hardware equipment, the algorithm has created a commercialized smart picking product that significantly enhances order sorting efficiency. This solution can mitigate the pressure brought by labor shortages during e-commerce promotions.

Key words: e-commerce logistics; intelligent pick-and-pass system; storage assignment; applied research