

基于路径优化的商品播种上下架方法

苏亮 徐毅刚 鲍俊捷 何志勇 杨靖

昆明创尼电子有限公司, 云南昆明, 650300;

摘要: 电商物流仓储系统中, 播种式拣货因适应多订单与小批量特征而广泛应用。播种作业涉及商品上架至播种墙与下架分拣两个核心环节, 其路径规划直接影响作业效率, 针对播种上下架路径冗长与效率低下问题, 构建播种墙货位坐标体系, 建立以最小化行走距离为目标的上架与下架路径优化模型, 引入货位布局约束与容量约束以及作业顺序约束, 设计改进蚁群算法求解模型, 通过动态信息素更新与局部搜索策略提升算法性能。仿真实验验证优化方法显著缩短作业路径, 提升播种作业效率, 为电商仓储播种作业提供理论支撑。

关键词: 播种作业; 路径优化; 上下架方法; 蚁群算法; 仓储管理

DOI: 10.64216/3080-1486.26.03.051

引言

电子商务发展使订单呈现多品类与小批量以及高频次特征, 播种式拣货通过“先拣后分”模式有效提升作业效率。播种作业包括商品上架存储与下架分拣两个环节, 作业人员需频繁往返于播种墙货位间, 路径规划直接影响作业时间与人工成本, 现有研究多聚焦传统拣货路径优化, 对播种模式下上下架协同路径优化研究较少, 播种作业具有货位固定与批次集中以及往返频繁等特点, 需构建专门优化模型。通过优化播种上下架路径, 缩短行走距离, 对提升仓储运营效率具有重要意义。

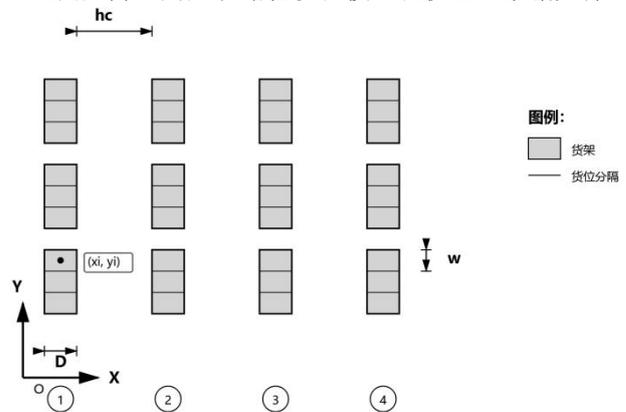
1 播种作业路径优化问题

电商物流订单有着多品类与小批量以及高频次这样的特征, 播种式拣货采用“先拣后分”模式来应对这类需求, 播种作业流程涵盖商品上架与订单下架这两个核心环节, 上架环节里作业人员把集中拣取商品按品类存到播种墙对应货位, 下架环节中作业人员依据订单需求从播种墙货位取出商品完成分拣, 播种墙一般由多排货架构成且包含数百个货位, 作业人员要频繁往返不同货位间完成存取操作^[1]。传统播种作业按照作业人员经验按货位编号顺序执行, 因缺乏科学路径规划导致行走路径冗长与重复往返频繁, 播种作业时间成本在仓储总成本中占比比较大, 路径优化能够有效缩短行走距离与提升作业效率以及降低人工成本, 这成为电商仓储运营管理急需解决的关键问题。

2 基于路径优化的商品播种上下架方法

2.1 播种墙货位坐标体系建立

播种墙货位坐标体系构建是路径优化工作的基础, 从图1能看到, 以播种墙左下角为原点去建立平面直角坐标系, X轴沿着水平方向指向右侧方向, Y轴沿着垂直方向指向上方位置, 播种墙是由多列货架组合而成的, 货架之间形成了若干垂直巷道以及水平通道, 假设播种墙总共有C列货架, 每列货架包含着若干排货架, 每排货架的编号设定为R, 每排货架里面包含着P个货位, 这里定义货架间巷道宽度为 hc , 货架深度设定为 D , 货位宽度设定为 w , 对于货位 i 而言, 其横坐标 x_i 要根据所在列数进行计算, 当列数为奇数的时候货位处于巷道左侧, 当列数为偶数的时候货位处于巷道右侧^[2]。货位纵坐标 y_i 是由所在排数与货位位置共同确定的, 作业人员行走路径按照曼哈顿距离来计算, 当两个货位处于同一巷道的时候距离为纵向距离与横向距离之和, 当两个货位处于不同巷道的时候需要考虑绕行距离, 通过货位坐标计算任意两个货位间的最短行走距离, 构建播种墙距离矩阵, 为后续路径优化模型提供基础数据支撑。



注: 以播种墙左下角为原点建立平面直角坐标系

图1 播种墙货位坐标体系示意图

2.2 商品上架路径优化模型

商品上架路径优化旨在确定作业人员访问各货位的最优顺序,使总行走距离最小,设待上架商品集合为 $I=\{1,2,\dots,n\}$,商品 i 需存储至播种墙货位 S_i ,起点为 S_0 ,作业人员从起点出发依次访问各货位完成上架后返回起点^[3]。定义决策变量 $x_{ij} \in \{0,1\}$,当 $x_{ij}=1$ 时表示作业人员从货位 i 直接前往货位 j ,否则 $x_{ij}=0$ 。设货位 i 与货位 j 之间的最短距离为 d_{ij} ,构建目标函数:

$$\min Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

式中: Z 为总行走距离; d_{ij} 为货位 i 到货位 j 的距离; x_{ij} 为路径决策变量; n 为待上架商品数量。模型约束包括:每个货位恰好被访问一次,即 $\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1$ 且 $\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1$;作业人员从起点出发且返回起点;消除子回路约束确保路径连续性,该模型属于旅行商问题,通过优化货位访问顺序减少往返行走,提升上架作业效率。

2.3 商品下架路径优化模型

商品下架路径优化是在商品上架模型基础上增加订单关联约束条件,设定订单集合为 $O=\{1, 2, \dots, m\}$ 且订单 o 包含商品子集 I_o ,下架作业要从播种墙货位取出商品来完成订单分拣工作,下架路径优化目标同样是 minimized 总行走距离,不过需要考虑订单完整性约束以及播种墙容量约束。构建下架路径优化模型:

$$\min Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

$$s.t. \sum_{j \in I_o} x_{ij} q_j \leq Q, \forall o \in O \quad (3)$$

式中: I_o 为订单 o 包含的商品货位集合; q_j 为货位 j 的商品需求量; Q 为容量限制。下架模型约束包括:每个货位访问次数与商品需求量相关;同一订单商品需在同一批次下架;作业人员携带商品总量不超过容量,通过协调订单需求与货位分布,优化下架路径顺序,减少重复访问,提升分拣效率^[4]。

2.4 改进蚁群算法求解

蚁群算法通过模拟蚂蚁觅食行为求解路径优化问题,适用于播种上下架路径优化,标准蚁群算法易陷入局部最优且收敛速度慢,需针对播种作业特征进行改进^[5]。在算法初始化阶段,会根据货位距离矩阵采用最近

邻策略来构造初始解,以此提升初始解的质量,在路径构建阶段,蚂蚁 k 会根据信息素浓度 τ_{ij} 以及启发式信息 η_{ij} 来选择下一货位,其转移概率会结合距离倒数与信息素浓度进行动态调整,引入了自适应信息素更新机制,在全局信息素更新时仅对当前迭代最优路径进行正反馈,在局部信息素更新时对已访问路径进行挥发以避免信息素过度积累,设置了动态挥发系数 ρ ,该系数会随迭代次数增加而逐步减小,从而平衡算法全局搜索与局部开发能力,增加了局部搜索算子,对每代最优解执行 2-opt 交换操作以进一步优化路径质量。算法终止条件设置为达到最大迭代次数或者连续若干代最优解未改进,通过这些改进策略来提升算法求解播种路径优化问题的性能。

3 优化方法性能评估

3.1 仿真实验设计

仿真实验是按照某电商仓储中心播种作业场景来构建的,播种墙由 10 列货架组合而成,每列包含 8 排货架且每排设置 5 个货位,总计有 400 个货位,货架间巷道宽度设定为 1.4m,水平通道宽度是 2.8m,货架深度为 0.6m,货位宽度为 0.4m,作业人员平均行走速度为 1.2m/s,商品上架操作时间是 2s/件,下架操作时间为 1.5s/件,实验设置了三组不同规模的场景,小规模场景包含 30 个待上架商品与 20 个订单,中规模场景包含 50 个待上架商品与 40 个订单,大规模场景包含 80 个待上架商品与 60 个订单,商品需求量服从均匀分布 $U(1, 3)$,订单包含商品数量服从均匀分布 $U(2, 8)$,改进蚁群算法的参数设置情况为蚂蚁数量 50,最大迭代次数 100,初始信息素浓度 1.0,信息素重要程度因子 1.0,启发因子 2.0 与信息素挥发系数 0.1,对比算法选择了标准蚁群算法与遗传算法,每组场景独立运行 10 次并取平均值来进行性能评估。

3.2 路径优化效果验证

路径优化效果是通过比较优化前后的行走距离与作业时间来体现的,优化前采用的是按照货位编号顺序的传统作业方式,优化后采用的是通过改进蚁群算法求解得出的最优路径,三组规模场景下的路径优化效果对比如表 1 所示。

表1 不同规模场景路径优化效果对比

场景规模	上架路径优化前/m	上架路径优化后/m	上架路径节约率/%	下架路径优化前/m	下架路径优化后/m	下架路径节约率/%
小规模	386.5	298.2	22.8	412.8	301.5	27.0
中规模	628.4	476.9	24.1	681.2	485.7	28.7
大规模	1015.8	765.3	24.7	1092.6	771.4	29.4

表1数据表明,改进蚁群算法在三组场景下均实现显著路径优化效果,上架路径节约率随场景规模增大从22.8%提升至24.7%,下架路径节约率从27.0%提升至29.4%,大规模场景下优化效果更明显,反映算法在复杂场景中的优势,下架路径节约率高于上架路径,原因在于下架作业涉及订单关联约束,传统方式重复访问现象

更严重,优化空间更大,路径优化直接转化为作业时间缩短,有效提升播种作业效率。

3.3 算法性能评价

算法性能评价从求解质量与收敛速度以及稳定性三个维度展开,改进蚁群算法与标准蚁群算法以及遗传算法在三组场景下的性能对比如表2所示。

表2 不同算法性能对比

算法类型	小规模最优解/m	小规模平均迭代次数	中规模最优解/m	中规模平均迭代次数	大规模最优解/m	大规模平均迭代次数
改进蚁群算法	298.2	67	476.9	73	765.3	82
标准蚁群算法	315.8	89	502.6	94	812.7	98
遗传算法	321.4	85	518.3	91	835.9	96

表2显示改进蚁群算法在求解质量以及收敛速度上均优于对比算法,小规模场景下最优解较标准蚁群算法缩短5.6%,较遗传算法缩短7.2%;大规模场景下优势更明显,分别缩短5.8%以及9.2%,收敛速度方面,改进算法平均迭代次数减少20%以上,验证动态信息素更新与局部搜索策略的有效性,算法稳定性通过10次独立运行的标准差评估,改进算法标准差小于对比算法,表明求解结果稳定可靠,适用于播种路径优化问题。

4 结语

播种作业路径优化对提升电商仓储效率具有重要价值。通过建立播种墙货位坐标体系,分别构建上架与下架路径优化模型,采用改进蚁群算法求解,实现播种作业路径有效优化,仿真实验验证优化方法在不同规模场景下均表现良好,显著缩短作业路径,提升作业效率,该研究为播种式拣货作业提供理论支撑与决策依据,有助于电商物流企业降低运营成本。未来研究可进一步考虑多播种墙协同与动态订单到达等复杂场景,结合智能

设备与实时调度,构建更完善的播种作业优化体系。

参考文献

- [1]刘进平,徐宁.考虑工作量平衡的大型商超订单分批与拣货的路径优化[J].大连海事大学学报,2025,51(02):87-96.
- [2]张金燕,吴蓬勃,王拓,等.面向仓库货架的商品智能拣选机器人设计[J].包装工程,2024,45(05):230-239.
- [3]李松柏.基于深度强化学习的物流车队配送路径规划及库内分拣作业路径优化研究[J].互联网周刊,2024,(02):28-30.
- [4]赖品谚,张大力,赵思翔.可移动货架下的储位选择与拣货路径联合优化[J].工业工程,2023,26(04):135-143.
- [5]闫军,王璐璐,常乐.仓配一体化仓库拣货路径优化策略应用研究[J].制造业自动化,2021,43(10):1-4+14.