

面向医药行业冷库的移动式货架仓储系统的货位优化研究^①

詹 燕^② 李 豪 汤洪涛 许丽丽

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023)

摘要 为提高移动式货架仓储系统的拣选效率,降低拣选能耗,对其在医药行业冷库应用中的货位优化问题进行研究。针对移动式货架仓储系统自身作业和医药冷库存储的特点,提出以同一巷道品种相关性最大和拣选能耗最小的策略来实现货位优化,建立多目标优化模型。在基本入侵杂草算法(IWO)基础上,设计了混合离散入侵杂草算法(HDIWO)进行仿真求解,通过引入多种群的思想来保证种群的多样性。在空间扩散阶段,采用自适应变异位数策略,用于初期的全局搜索和后期的局部搜索;在竞争生存之后,引入交叉算子和移民算子,增强种群内和种群之间交流。仿真结果表明,与入侵杂草算法、遗传算法相比,该方法具有更好的收敛性和全局搜索能力,能有效提高移动式货架仓储系统的拣选效率,降低拣选能耗,更适合移动式货架仓储系统的货位优化问题的研究。

关键词 移动式货架仓储系统;医药冷库;货位优化;混合离散入侵杂草算法(HDI-WO);多种群

0 引言

近年来,随着土地资源的日益稀缺以及消费者对服务水平的要求不断提高,仓储系统正加速向存取空间紧致化和服务时间即时化的方向演化^[1]。这种演化导致了一系列紧致化仓储系统的诞生,如文献[2,3]分别提出两种紧致化仓储系统,即三维紧致化仓储系统和 Live-Cube 系统。相比传统的仓储系统,紧致化仓储系统为实现高的空间利用率减少了存储货架之间的通道,使得货架排列更加紧凑。本文所研究的移动式货架仓储系统也是一种紧致化仓储系统,该系统能将仓库利用率提升至 85%,适用于冷库^[4],但拣选效率较低,因移动重型货架时往往需要耗费大量时间^[5],研究如何提升该系统的拣选效率就成为关键问题。

要提升仓储系统的拣选效率,采用科学合理的

货位管理和优化策略是至关重要的。目前国内外学者对仓储系统的货位优化问题开展了大量研究,文献[6]研究了存储区域的减少对订单拣选和存储空间成本的影响,提出非线性整数规划模型,并通过分支定界算法来求解,结果表明分类存储策略可以降低拣选和仓储成本。文献[7]研究了 milkrun 模式下的仓储系统货位分配问题,建立了混合整数规划模型,有效减少了订单周期时间和拣货工作量。文献[8]针对多层穿梭车仓储系统的货位分配问题进行了研究,通过建立一个两阶段开环排队网络模型,用于分析设备作业空闲时间和系统性能表现,并开发了基于蚁群聚类算法的储区划分方法提高系统存取效率。文献[9]构建了基于产品 BOM 中的相关性信息的货位优化模型,并提出了多阶段启发式算法求解该模型,有效提高了物料拣选效率。文献[10]研究了非传统布局仓储的货位优化问题,建立了以提高货架稳定性和出入库效率为目标的货位

^① 国家重点研发计划(2018YFB1308100)资助项目。

^② 女,1976 年生,博士,副教授;研究方向:供应链管理、物流系统优化;联系人,E-mail:yzhan@zjut.edu.cn
(收稿日期:2020-05-15)

优化模型,并通过自适应遗传算法和改进的粒子群算法进行优化分析。文献[11]针对电子产品立体仓库的货位优化问题进行了研究,构建了效率优先、相似产品相邻存放和货架稳定性为目标的货位优化模型,并设计改进的自适应遗传算法,有效避免了基本遗传算法的早熟问题。文献[12]研究了某农资仓库的入库货位分配问题,并提出一种改进的入侵杂草算法来求解。

以上针对货位优化问题的研究对象主要集中在固定式货架类型,其特点是货架是固定不动的;而对移动式货架仓储系统的研究较少,相关调度问题也值得关注。文献[13,14]均对移动式货架仓储系统的拣选路径问题进行了研究,前者在传统单面拣选的移动式货架基础上提出了一种双面拣选方式,后者提出了一种具有中间交叉通道的移动式货架仓储系统,二者均是在基本移动式货架仓储系统基础上引入其他特征,从而进行拣选路径优化研究。文献[5]针对基本移动式货架仓储系统的订单排序问题进行了研究,考虑到移动重型货架打开巷道的时间过长,将前一拣选订单访问的最后一个巷道作为下一拣选订单访问的第一个巷道,可减少巷道更新次数,从而缩短作业时间。文献[15]研究了按单拣选策略下的旋转货架和移动式货架的库存量单位(stock keeping unit, SKU)划分问题,重点解决了旋转货架的货位优化问题。这些研究虽然在提高移动式货架仓储系统的拣选效率方面起到一定促进作用,但并没有解决该种仓储系统的货物具体存放位置问题。在实际应用中,实现货物的具体货位分配,能更加充分地提高仓储效率,降低仓储能耗。

当前,随着冷链物流行业的快速发展,移动式货架仓储系统在企业中的应用价值巨大,尤其是高电价的地方,越来越多的冷库企业开始重视仓储的效率和能耗。

然而目前国内外关于冷库内的货位优化研究相对较少。文献[16]研究了N物流园冷链仓储的货位优化问题,依照效率优先和重量特性原则建立货位优化模型,运用遗传算法进行求解。文献[17]研究了第三方物流企业冷库的货位优化问题,对“一对一”和“多对一”两种货位系统分别展开分析,建

立货位优化模型,分别采用双重货物分类法和匈牙利算法来实现货位指派。文献[18]研究了某自动化医药冷库内的仓位分配问题,以药品周转率和药品相关性为依据,利用遗传算法进行双目标优化。文献[19]研究了某存储生鲜农产品的紧致型仓储系统的存储策略问题,利用车辆到达时间信息,建立基于共享存储的货物存储数学模型。文献[20]研究了双侧均能装卸货物的深巷道存储系统的货位分配问题,得出当卡车到达时间不确定时,双侧装卸能大大减少货物堵塞。文献[21]针对卡车到达时间不稳定的问题,提出了一种鲁棒性较强的深巷道存储系统的货位分配方法,该方法能有效减少出库堵塞。

综上所述,以移动式货架仓储系统为研究对象,面向冷库的货位优化研究较少,尤其是关于冷库内的货位优化研究几乎没有考虑到能耗的影响。然而对于存储耗能高的冷库来说,应当考虑能耗对仓库的影响。此外,大多数货位分配问题研究依然采用的是遗传算法、粒子群算法等,将入侵杂草算法(invasive weed optimization, IWO)应用到仓库货位分配问题的研究非常少。入侵杂草算法操作简单,且全局搜索能力强,已在供应商选择、电力系统经济调度和投资组合等多种工程领域得到成功应用^[22-24]。因此,本文考虑到移动重型货架时间过长的特点,将同一巷道品项相关性最大作为重点优化目标之一,将能耗最小作为另一优化目标。以某医药企业冷库为例,针对订单拣选效率低下、药品货位缺乏规划、拣选过程耗能过多等问题,以移动式货架仓储系统为研究对象,建立以同一巷道品项相关性最大和拣选能耗最小为目标的货位优化模型,然后设计了混合离散入侵杂草算法求解得到货物最佳存放位置,从而提高仓库拣选效率,降低作业能耗,为冷链物流的绿色和可持续发展提供数据支持。

1 问题描述

某医药企业冷库采用移动式货架仓储系统,其仓储系统示意图如图1所示。该系统主要由可移动货架、移动轨道、叉车、仓储管理和控制系统组成,两排背靠背货架成一组安装在一个移动底盘上,每排

货架下方有一台电机驱动(除最外侧两排货架),由装置于货架底部的滚轮沿着铺设在地面上的轨道移动。通常移动式货架仓储系统只需开放一条巷道用于执行货物的出入库,因此空间利用率极高,叉车进入巷道后,能服务于巷道两侧的两排货架。

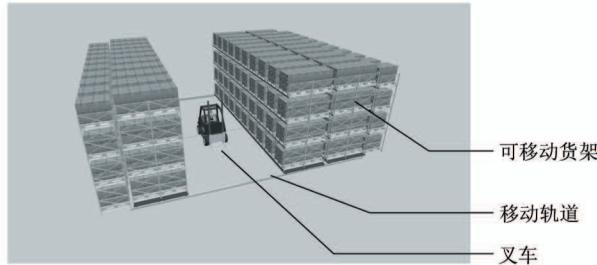


图 1 某医药企业移动式货架仓储系统示意图

图 2 为移动式货架仓储系统简化图,仓储系统排的方向为 x ,列的方向为 y ,层的方向为 z 。图中每一格表示一个货位,任意一个货位坐标 (x, y, z) 分别表示该货位所对应的排列层。

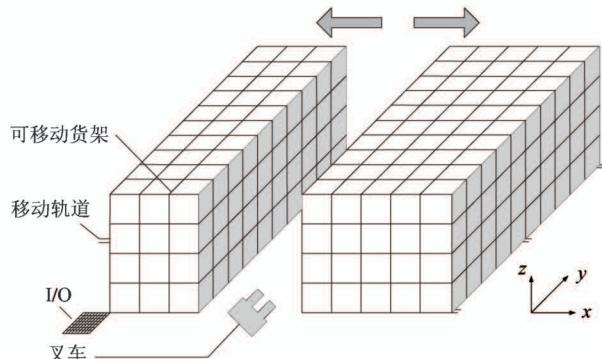


图 2 移动式货架仓储系统简化图

该医药企业冷库主要用来存储各种药品,采用托盘存放,具有存储品种多、轻重混杂、存储耗能大等特点。在本研究进行前,该企业并未针对以上特点进行仓库的优化管理,药品货位规划缺乏科学性,且没有充分利用药品之间的相关性,因而造成订单拣选效率低下和拣货设备耗能过多等问题。

在移动式货架仓储系统订单拣选过程中,移动重型货架打开巷道会导致叉车相当长的等待时间,从而延长了订单执行时间。因此,针对该种类型仓库的货位优化问题,需尽可能将同一订单上(相关性强)的品项存放在同一巷道两侧的货架上,以减少打开巷道的次数,从而提高单一订单拣选效率。

针对多张订单拣选时,可采用订单合并策略,此处不多加讨论。除了考虑存放在同一巷道的品项之间的相关性外,由于本文的研究对象为医药冷库,耗能巨大是其一大特点,因此在对仓库货位进行优化时,需尽可能降低设备作业能耗。鉴于此特点,适用于存储普通物资的传统仓库的货位优化模型已不再适用于本文的医药冷库移动式货架仓储系统,需对该种仓库货位优化问题进行研究。

2 数学建模

为方便移动式货架仓储系统的货位优化数学模型的建立,对模型做出如下假设。

- (1) 仓库货位数量大于药品品项数量,且每个品项的拣选频率和质量均已知。
- (2) 每个货位规格一样且仅能容纳一个品项,每个品项有且只有一个货位,每个品项可能存储在任何一个货位。
- (3) 最外侧货架为单排且不能移动,其余每组可移动货架为背靠背两排,货架移动为整体移动。
- (4) 考虑最基本的移动式货架配置,因此只有一辆叉车。
- (5) 叉车只能从单侧进入和离开。
- (6) 仓库 I/O 位于第一排货架左端,见图 2。

2.1 符号定义

符号定义如表 1 所示。

表 1 符号定义表

符号	定义
a	货架总的排数
b	货架总的列数
c	货架总的层数
w	单元货格的宽度
h	单元货格的高度
d	单元货格的深度
K	巷道数目
l	巷道宽度
N	药品品项数
L	货位数
μ	叉车与地面的摩擦系数
g	重力加速度

2.2 模型建立

货位优化的主要目的就是依据货物和货架的特点,给货物分配合理的存储位置,从而提高仓储效率,降低仓储成本。为兼顾医药冷库移动式货架仓储系统的拣选效率和能耗,需建立适用于该系统的货位优化模型。

2.2.1 同一巷道的品项相关性最大

以同一巷道的品项相关性最大为目标的数学模型可表示为

$$\max f_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N S_{ij} \cdot r_{ik} \cdot r_{jk} \quad (1)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K r_{ik} = 1, i = 1, \dots, N \\ r_{ik} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)表示同一巷道的品项相关性最大的目标函数,其中,K为巷道数目,i和j表示品项编号,N表示品项数目,r_{ik}=1表示品项i存放在巷道k的货架上,否则r_{ik}=0,r_{jk}同理。式(2)表示每个品项只能分配到一个巷道和r_{ik}的取值约束。S_{ij}为采用Russel and Rao提出的相似系数计算公式计算所得的两两品项之间的相似系数^[25],计算公式如下:

$$S_{ij} = \frac{A}{A + B + C + D} \quad (3)$$

其中,A表示同时包含品项i和品项j的订单数量;B表示仅包含品项i的订单数量;C表示仅包含品项j的订单数量;D表示品项i和品项j都不包含的订单数量。

2.2.2 拣选能耗最小

定义品项i的修正质量计算公式如下:

$$M_i = m_i \cdot f_i \quad (4)$$

式中,M_i为品项i的修正质量,m_i为品项i的真实质量,f_i为品项i的拣选频率。

对于任意货位c,其坐标为(x,y,z),该货位的单位质量能耗函数为

$$d_c(h, l) = \mu \cdot g \cdot l_c + g \cdot h_c \quad (5)$$

式中,d_c(h,l)为货位c的单位质量能耗,通过将单位质量的货物搬运过程中克服摩擦力和重力所做的功来表示。μ为叉车与地面的摩擦系数,通常0.45<μ<0.6,g为重力加速度,l_c为叉车从I/O位置到

货位c的水平面上的行驶距离,h_c为货位c的竖直高度。

l_c和h_c的计算公式如下:

$$l_c = \begin{cases} x \cdot d + \frac{l}{2} + y \cdot w & \text{当 } x \text{ 为奇数时} \\ (x - 1) \cdot d + \frac{l}{2} + y \cdot w & \text{当 } x \text{ 为偶数时} \end{cases} \quad (6)$$

$$h_c = (z - 1) \cdot h \quad (7)$$

以拣选能耗最小为目标的数学模型可表示为

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^L M_i \cdot d_c(h, l) \cdot b_{ic} \quad (8)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N b_{ic} \leq 1, c = 1, \dots, L \\ \sum_{c=1}^L b_{ic} = 1, i = 1, \dots, N \\ b_{ic} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (9)$$

其中,式(8)表示拣选能耗最小的目标函数,b_{ic}=1表示品项i存放在货位c上,否则b_{ic}=0;式(9)表示每个货位最多存放一个品项和每个品项只能占用一个货位以及取值约束。

2.2.3 货位优化的数学模型

由上述目标函数和约束条件,可构建货位优化模型如下:

$$\begin{cases} \max f_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N S_{ij} \cdot r_{ik} \cdot r_{jk} \\ \min f_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^L M_i \cdot d_c(h, l) \cdot b_{ic} \end{cases} \quad (10)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K r_{ik} = 1, i = 1, \dots, N \\ r_{ik} \in \{0, 1\} \\ \sum_{i=1}^N b_{ic} \leq 1, c = 1, \dots, L \\ \sum_{c=1}^L b_{ic} = 1, i = 1, \dots, N \\ b_{ic} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (11)$$

2.3 构建评价函数

显然,该问题为多目标优化问题,由于模型中的两个分目标函数都取正值,且目标函数f₁为极大

化, 目标函数 f_2 为极小化, 因此, 可以利用分目标乘除法构建评价函数为

$$\min f = \frac{f_2}{f_1} \quad (12)$$

3 算法求解

入侵杂草算法是由 Mehrabian 和 Lucas^[26] 提出的一种模拟自然界中杂草入侵扩张过程的人工智能优化算法, 具有很强的鲁棒性、适应性和随机性, 适用于连续性问题的求解。文献[27]将入侵杂草算法用于离散问题的研究, 以流水车间批量流集成调度问题为研究对象, 并通过仿真验证了所提出算法的有效性。鉴于入侵杂草算法广泛的适用性及其简单的实现过程, 本文将该算法用于解决移动式货架仓储系统的货位优化问题, 文中设计了混合离散入侵杂草算法, 并通过实例验证了算法的有效性和优越性。

基本的 IWO 主要通过杂草繁殖、空间扩散和竞争生存 3 个手段来实现对最优解的搜索, 本文在 IWO 基础上设计了混合离散入侵杂草算法 (hybrid discrete invasive weed optimization, HDIWO)。算法初始时, 将多种群协同进化的思想引入到 IWO 中, 避免因种群数量单一而导致的求解效率低下的问题。在杂草繁殖阶段, 通过每棵杂草的目标函数值计算产生的种子数。在空间扩散阶段, 设计基于自适应变异位数的空间扩散算子, 用于初期全局搜索和后期局部搜索。在竞争生存阶段, 将各种群中的杂草按照目标函数值进行排序, 保持种群大小。最后, 为增强算法的全局搜索能力以及种群之间交流, 引入多种群遗传算法的交叉算子和移民算子。算法流程图如图 3 所示。

3.1 编码设计

通过对品项和货位同时进行编号, 采用自然数排列编码方式, 将问题简化。编码长度依赖于品项数目, 当品项数目为 N 时, 一条编码由 N 个不重复的自然数组成, 每个自然数分别对应一个货位编号。编码示例如图 4 所示, 品项 1 存放在货位 13 上, 品项 2 存放在货位 3 上, ……, 依次类推, 直到 N 个品项均已分配货位。

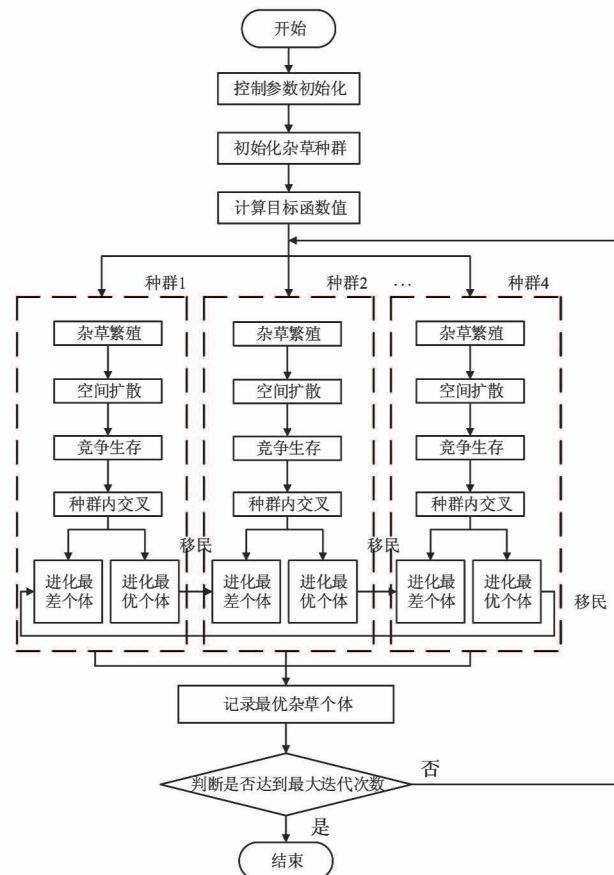


图 3 HDIWO 算法流程图

品项编号	1	2	3	4	5	...	$N-1$	N
货位编号	13	3	7	4	1	...	15	10

图 4 编码示例

3.2 HDIWO 算法步骤

步骤 1 基于移动式货架仓储系统货位优化模型的特点, 初始化杂草种群和相关参数。初始化杂草种群采用随机生成, 算法相关参数包括: 初始杂草数量 N_0 , 杂草种群最大规模 N_{max} , 种群数量 MP , 最大迭代次数 $iter_{max}$, 每棵杂草能够产生的种子数最大值 S_{max} 和最小值 S_{min} , 非线性调制指数 n , 杂草进行空间扩散时的标准差初始值 σ_{init} 和标准差最终值 σ_{final} , 交叉概率 P_c 。

步骤 2 记录每棵杂草的目标函数值, 然后记录最优秀杂草个体和最优解。

步骤 3 杂草繁殖阶段: 根据每棵杂草的目标函数值, 运用式(13)计算各杂草产生的种子数目。

$$weed_n = \lfloor S_{max} - \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}}(S_{max} - S_{min}) \rfloor \quad (13)$$

式中, f 表示当前杂草的目标函数值, f_{max} 和 f_{min} 分别表示当前种群中杂草的目标函数的最大值和最小值, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

步骤4 空间扩散阶段:杂草种子按照均值为0、标准差为 σ 的正态分布散布在父代杂草周围。随着迭代次数的增加, σ 也会从初始值 σ_{init} 减小到最终值 σ_{final} ,具体到某一代时,采用式(14)计算标准差的大小。

$$\sigma = \frac{(\bar{iter}_{max} - iter)^n}{(\bar{iter}_{max})^n} (\sigma_{init} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (14)$$

式中, $iter$ 表示当前迭代次数。由于本文采用的编码设计不是简单向量的形式,因而不能在此使用原始的适用于连续问题的空间扩散算子。为此,设计基于自适应变异位数的空间扩散算子,随机选取两个位置,然后将两个位置的数字互换。在标准 IWO 中,种子的分散过程服从均值为0、标准差为 σ 的正态分布, σ 的大小决定了种子的搜索范围。受此启发,令变异的执行次数 d 服从 $N(0, \sigma^2)$,将所得随机数 α 取绝对值后向上取整 $\lceil |\alpha| \rceil$ 作为变异的执行次数 d 。

步骤5 竞争生存阶段:将各种群中的所有杂草按照目标函数值进行排序,留下目标函数值小的优秀杂草,淘汰目标函数值大的弱势杂草,各种群中的杂草数目不能超过种群最大规模 N_{max} 。

步骤6 种群内交叉阶段:随机选择两棵父代杂草,采用基于部分映射的交叉算子,以指定概率 p_c 生成两个子代。

步骤7 移民阶段:将源种群中的进化最优杂草替换目标种群中的进化最差杂草,实现种群之间交流。

步骤8 记录所有种群中的最优杂草个体。

步骤9 迭代一次完成,判断是否达到最大迭代次数 $iter_{max}$,若达到,则输出最优杂草个体,即最优货位优化结果,否则返回步骤3。

4 仿真实验与分析

4.1 仿真参数信息

以某医药企业移动式货架仓储系统为研究对

象,在 Matlab 中编程并仿真,验证移动式货架仓储系统货位优化模型的适用性及 HDIWO 算法的优越性。本文研究的移动式货架仓储系统仿真基本参数如表 2 所示。采用 Matlab2017b 编译,运行环境 INTEL 酷睿 i5-6300HQ 3.2 GHz 8 GB, 操作系统 Windows 10。

表 2 移动式货架仓储系统仿真基本参数

仿真参数	取值
货架宽度 w	1.3 m
货架高度 h	1.4 m
货架深度 d	1.1 m
总的排数 a	8
总的列数 b	10
层数 c	4
巷道宽度 l	4.3 m
叉车与地面的摩擦系数 μ	0.5
重力加速度 g	9.8 m/s ²

在该仓库某次货位优化任务中,需满足 291 个品项存储需求,仓储系统共 320 个货位,每个货位仅能存放一个品项,各品项的拣选频率和质量均已知,两两品项之间的相似系数也已基于历史订单数据计算求得,分别采用遗传算法(genetic algorithm, GA)、入侵杂草算法(IWO)、混合离散入侵杂草算法(HDIWO)进行仿真求解,验证 HDIWO 在解决移动式货架仓储系统的货位优化问题上的有效性和优越性。GA 采用常用的参数,由于文献[28]中采用 IWO 算法解决了带阻塞的流水车间调度问题,因此,本文的 IWO 和 HDIWO 的参数均参考文献[28]中的参数。3 种算法的各项仿真参数设置如下。

GA: 种群大小 $NIND = 80$; 最大迭代次数 $iter_{max} = 3000$; 交叉概率 $P_c = 0.8$; 变异概率 $P_m = 0.01$ 。

IWO^[28]: 初始杂草数量 $N_0 = 20$; 杂草种群最大规模 $N_{max} = 80$; 最大迭代次数 $iter_{max} = 3000$; 每棵杂草能够产生的种子数最大值 $S_{max} = 5$; 每棵杂草能够产生的种子数最小值 $S_{min} = 0$; 非线性调制指数 $n = 3$; 杂草进行空间扩散时的标准差初始值 $\sigma_{init} = 5$; 杂草进行空间扩散时的标准差最终值 $\sigma_{final} = 0.05$ 。

HDIWO: 初始杂草数量 $N_0 = 20$; 杂草种群最大

规模 $N_{max} = 80$; 杂草种群数目 $MP = 4$; 最大迭代次数 $iter_{max} = 3000$; 每棵杂草能够产生的种子数最大值 $S_{max} = 5$; 每棵杂草能够产生的种子数最小值 $S_{min} = 0$; 非线性调制指数 $n = 3$; 杂草进行空间扩散时的标准差初始值 $\sigma_{init} = 5$; 杂草进行空间扩散时的标准差最终值 $\sigma_{final} = 0.05$; 交叉概率 $P_c = 0.8$ 。

4.2 仿真结果

运用所建立的货位优化数学模型对该次货位优化任务进行仿真优化, 目标函数的优化曲线如图 5 所示, 算法各运行 20 次后的性能对比如表 3 所示。

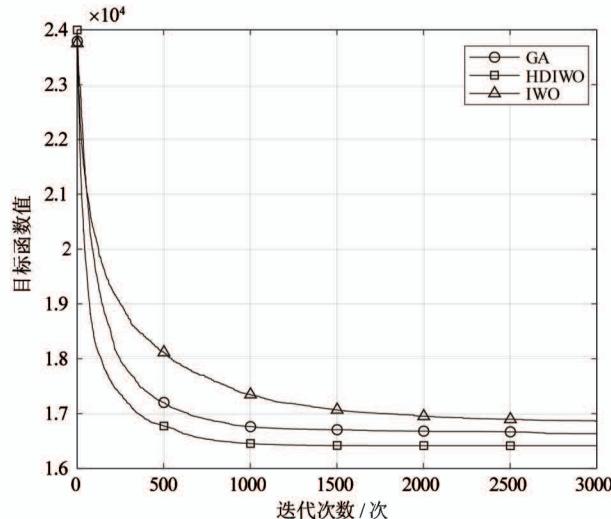


图 5 目标函数优化曲线

表 3 算法性能对比

	GA	IWO	HDIWO
目标函数平均值	16605.43	16842.04	16364.89
平均收敛代数	2703	2814	1407
平均计算时间/s	135.05	106.90	245.42
目标函数标准差	129.61	191.67	93.77

由图 5 可知, 随着迭代次数增加, 目标函数值在逐渐减小, 与 GA 和 IWO 相比, HDIWO 在解的质量方面表现最优, 具有更好的全局搜索能力。HDIWO 在迭代至 1384 代达到最优, 此时目标函数值为 16 412.88, 而初始时目标函数值为 23 996.51, 优化效率为 31.5%。可以看出, GA 收敛速度较慢, 并且容易陷入局部最优; IWO 由于杂草的搜索能力有限, 使得种群无法集中在最优杂草周围, 因而求解效果不佳。

由表 3 可知, 从计算时间上看, GA 和 IWO 均有优势, 但搜索能力有限, 容易陷入局部最优。这是因为 GA 仅采用基本的交叉和变异算子, 且种群太过单一, 容易被某一个解主导。IWO 由于仅能通过空间扩散算子去产生新解, 搜索太过局限, 因而也容易陷入局部最优。HDIWO 计算时间较长主要是因为多个种群协同进化, 且在基本的 IWO 基础上加入了交叉和变异算子, 因此算法计算量大。从目标函数标准差上看, GA 和 IWO 所得结果波动较大, 而 HDIWO 所得结果波动较小, 求解结果更稳定。鉴于 HDIWO 具有更好的求解质量和稳定性, 且计算时间在可接受范围之内, 从计算成本角度考虑得出, HDIWO 更适合于移动式货架仓储系统的货位优化问题的求解。

综上, 所建立的货位优化数学模型适用于移动式货架仓储系统, 运用 HDIWO 可有效提高仓储系统的拣选效率, 降低拣选能耗。HDIWO 较 IWO 和 GA 搜索效率更好, 求解更优, 能较好地解决 GA 的局部收敛和 IWO 的搜索能力差等问题。

5 结论

本文详细介绍了移动式货架仓储系统的结构和作业特点, 并对其在医药行业冷库应用中的货位优化问题进行了研究, 提出以同一巷道的品项相关性最大和拣选能耗最小的策略来实现货位的智能优化分配, 建立多目标优化模型。针对该模型, 开发了混合离散入侵杂草算法进行求解。仿真结果表明, 与遗传算法和入侵杂草算法相比, 文中所提的混合离散入侵杂草算法求解更加优异且高效, 所得结果能有效提高仓储效率, 降低拣选能耗。本研究成果较好地实现了移动式货架仓储系统的货位优化, 具有一定应用价值。文中所考虑的移动式货架仓储系统仅开放一个巷道, 作业方式不灵活, 后续将对开放多个巷道时的移动式货架仓储系统建模与优化。

参考文献

- [1] 沈古文. 紧致仓储系统绩效及运作策略研究 [D]. 武汉:华中科技大学管理学院, 2014:1-2
- [2] Yu Y G, De Koster R. Optimal zone boundaries for two-

- class-based compact three-dimensional automated storage and retrieval systems [J]. *IIE Transactions*, 2009, 41(3):194-208
- [3] Zaerpour N, Yu Y G, De Koster R. Small is beautiful: a framework for evaluating and optimizing live-cube compact storage systems [J]. *Transportation Science*, 2017, 51(1):34-51
- [4] 潘恒, 梁涛, 黎青松. 某医药仓库电动移动货架方案评价[J]. 物流技术, 2014(1): 167-171
- [5] Boysen N, Briskom D, Emde S. Sequencing of picking orders in mobile rack warehouses [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 259(1):293-307
- [6] Muppani V R, Adil G K. A branch and bound algorithm for class based storage location assignment [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(2):492-507
- [7] Kovacs A. Optimizing the storage assignment in a warehouse served by milkrun logistics [J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 133(1):312-318
- [8] Wang Y Y, Mou S D, Wu Y H. Storage assignment optimization in a multi-tier shuttle warehousing system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(2):421-429
- [9] Xiao J, Zheng L. A correlated storage location assignment problem in a single-block-multi-aisles warehouse considering BOM information [J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(5):1321-1338
- [10] 胡颖聪, 刘建胜, 张有功. 基于AGA与MPSO的非传统布局仓储货位分配优化[J]. 高技术通讯, 2018, 28(11-12):980-990
- [11] Yan B, Yan C, Long F, et al. Multi-objective optimization of electronic product goods location assignment in stereoscopic warehouse based on adaptive genetic algorithm [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29(6):1273-1285
- [12] 段悦. 基于改进入侵杂草算法的仓库货位分配优化研究[D]. 合肥:中国科学技术大学物质科学研究院, 2018: 31-43
- [13] Chang T H, Fu H P, Hu K Y. A two-sided picking model of M-AS/RS with an aisle-assignment algorithm [J]. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(17):3971-3990
- [14] Hu K Y, Chang T H, Fu H P, et al. Improvement order picking in mobile storage systems with a middle cross aisle [J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(4):1089-1104
- [15] Kress D, Boysen N, Pesch E. Which items should be stored together? A basic partition problem to assign storage space in group-based storage systems [J]. *IIE Transactions*, 2017, 49(1):13-30
- [16] 吴锦梅. N物流园冷链仓储货位优化研究[D]. 南宁: 广西大学商学院, 2018:21-28
- [17] 邱婉. 第三方物流企业冷库货位系统规划与设计[D]. 兰州: 兰州交通大学交通运输学院, 2018:22-31
- [18] 任荟颖,邹鲲,孙涛. 基于遗传算法的自动医药冷库仓位分配[J]. 制造业自动化, 2018, 40(9):28-33
- [19] Zaerpour N, Yu Y G, De Koster R. Storing fresh produce for fast retrieval in an automated compact cross-dock system [J]. *Production and Operations Management*, 2015, 24(8):1266-1284
- [20] Boysen N, Boywitz D, Weidinger F. Deep-lane storage of time-critical items: one-sided versus two-sided access [J]. *OR Spectrum*, 2018, 40(4):1141-1170
- [21] Boywitz D, Boysen N. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage systems [J]. *Computers and Operations Research*, 2018, 100:189-200
- [22] Niknamfar A H, Niaki S T A. A binary-continuous invasive weed optimization algorithm for a vendor selection problem [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2017, 140:158-172
- [23] Barisal A K, Prusty R C. Large scale economic dispatch of power systems using oppositional invasive weed optimization [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 29:122-137
- [24] Pouya A R, Solimanpur M, Rezaee M J. Solving multi-objective portfolio optimization problem using invasive weed optimization [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2016, 28:42-57
- [25] 王文蕊. 电子商务配送中心的设计与优化策略研究[D]. 济南: 山东大学控制科学与工程学院, 2014: 46-47
- [26] Mehrabian A R, Lucas C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization [J]. *Ecological Informatics*, 2006, 1(4):355-366
- [27] Sang H Y, Pan Q K, Duan P Y, et al. An effective discrete invasive weed optimization algorithm for lot-streaming flowshop scheduling problems [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29(6):1337-1349

- [28] Shao Z S, Pi D C, Shao W S. A multi-objective discrete invasive weed optimization for multi-objective blocking flow-shop scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 113:77-99

Research on slotting optimization of the mobile racks warehousing system for cold storage in pharmaceutical industry

Zhan Yan, Li Hao, Tang Hongtao, Xu Lili

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

In order to improve the picking efficiency and reduce the picking energy consumption of the mobile racks warehousing system, the optimization of the slotting in the cold storage application of the pharmaceutical industry is studied. According to the characteristics of the operation of mobile racks warehousing system and the cold storage of medicines, a strategy that maximizes the correlation of items in the same aisle and minimizes the energy consumption of picking is proposed to achieve the optimization of slotting. A multi-objective optimization model is established. Based on the basic invasion weed optimization algorithm (IWO), a hybrid discrete invasion weed optimization algorithm (HDIWO) is designed for simulation. The algorithm introduces the idea of multiple population to ensure the diversity of the population, and uses the adaptive mutations number strategy in the spatial dispersal stage for the initial global search and the later local search. After competing for survival, crossover and immigration operators are introduced to enhance communication within and between populations. Simulation results show that compared with the invasion weed optimization algorithm and genetic algorithm, this method has better convergence and global search capability. It can effectively improve the picking efficiency of the mobile racks warehousing system, reduce the picking energy consumption, and is more suitable for the optimization of the slotting of the mobile racks warehousing system.

Key words: mobile racks warehousing system, pharmaceutical cold warehouse, slotting optimization, hybrid discrete invasive weed optimization algorithm (HDIWO), multiple population