





文章

# 离散粒子群优化求解 配送中心的入库路径问题

罗德里戈·安德烈斯·戈麦斯-蒙特亚1,2、何塞·亚历杭德罗·卡诺3,\*和 , 巴勃罗·科尔特斯4  
费尔南多·萨拉查5 

<sup>1</sup> 哥伦比亚理工学院 Jaime Isaza Cadavid 行政学院, Carrera 48 No. 7-151, Medellín 050022, 哥伦比亚;  
ragomez@elpoli.edu.co ESACS-供应链管理高等学院,

<sup>2</sup> Calle 4 # 18-55, Medellín 050021, Columbia 3经济与管理科学学院, 麦德林大学, Carrera 87 #  
30-65, Medellín 050026,

Columbia塞维利亚大学工程高等技术学院, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 塞维利亚, 西班牙;  
pca@us.es 5经济与行政科学

<sup>4</sup> 学院, Pontificia Universidad Javeriana, Cra. 7 #40, Bogotá 110231, 哥伦比亚;  
salazar.fernando@javeriana.edu.co

\*通讯: jacano@udem.edu.co

收稿日期: 2020年9月2日; 接受日期: 2020年10月7日; 发布日期: 2020年11月18日



**摘要:** 入库操作通常包括使用操作员或物料搬运设备 (MHE) 将产品从仓库移动到分配的存储位置, 这会占用仓库的重要运营成本并影响运营效率。因此, 本文旨在制定并解决配送中心 (DC) 的入库路由问题 (PRP)。该 PRP 公式代表了一种新颖的方法, 因为考虑到了一系列同质物料搬运设备 (MHE)、与上架清单大小、仓库位置和配送中心的多平行通道相关的异构产品。应该指出的是, 文献中通常研究时隙问题, 而不是 PRP, 而本文讨论的是 PRP。使用离散粒子群优化 (PSO) 算法求解 PRP, 该算法与禁忌搜索方法 (经典禁忌搜索 (CTS)、禁忌搜索 (TS) 2-Opt) 和经验规则进行比较。结果发现, 离散 PSO 可以生成最佳解决方案, 对于实验中评估的不同因子水平组合, 相对于 CTS 和 TS 2-Opt, 时间节省范围为 2% 到 13%。

**关键词:** 上架路线; 配送中心; 离散粒子群优化; 订单拣选; 仓库管理

## 一、简介

入库操作主要包括使用操作员或物料搬运设备 (MHE) 将产品从存储库存以供以后使用的地点 (仓库) 移动到指定的存储地点 [1,2]。入库还包括订单批处理和路由以将产品放置在存储系统中。订单批量问题将多个订单合并为一批, 以便在一次巡演中将多个订单的商品放置在存储系统中, 生成有效的路线并减少行驶距离 [3], 而拣货路线问题则计划最短的巡演以最小化将所有物品放入一批中所需的时间和距离 [4]。订单批处理和路径问题应该联合解决, 因为订单分组直接影响拣选路径中访问存储位置的顺序, 并且与顺序相比会产生显著的性能优势。

解决这些问题[5,6]。因此,上架操作与配送中心(DC)的入库物流相关,会影响效率和客户满意度。

配送中心是一个仓库设施,它保存从制造到待配送到适当商店的库存[2],然后提货并交付货物以满足商店的需求[7]。在配送中心层面,主要作业包括收货、入库、订单拣选、分拣、越库配送和运输[8],绩效指标通常集中在物料搬运效率[9]。从这些操作中,入库不仅占配送中心为零售商店配送货物的物流成本的约 15% [1,10],而且还会由于人力资源、人力资源等资源的使用而影响效率。MHE、信息和通信技术(ICT)等[10]。因此,必须有效地计划、执行和控制该操作。

在具有多层存储系统的 DC 中,可能需要使用多个 MHE,这些 MHE 可以根据仓库的高度和产品类型(重量或体积)访问存储位置。这些特征会增加问题表述及其解决方案的复杂性[11]。此外,该操作与存储位置分配问题直接相关,因为产品必须分配到存储位置。因此,这些决策应该是整合和同步的,因为它们是相互依赖的[5,12]。此外,入库操作在物流流程中变得越来越重要,其中产品必须在最短的时间内放置在指定的存储位置。例如,需要冷链上架操作的产品可以被归类为关键产品,因为如果处理得不够快,这些产品可能会损坏。

同样,危险产品必须快速有效地存放起来,因为这些产品可能会在配送中心产生交叉污染[1]。这些原因是一些例子,说明并证明了DC中此操作的重要性。

因此,本文制定并解决了配送中心的入库路由问题(PRP),考虑使用元启发式的多个 MHE 和 3D 仓库来提供有效的解决方案。本文的其余部分安排如下。第二部分介绍了PRP的文献综述以及该问题的解决方法。第三部分描述并制定了PRP。第四部分介绍了求解 PRP 的离散 PSO 算法。第五部分进行了实验研究。第六部分显示实验结果和讨论。最后,第七部分给出了结论和进一步的研究。

## 2.文献综述

从文献综述的结果可以发现,关于上架操作的研究仅集中在存储位置的分配上。所审查的研究使用基于类的存储策略来分配存储区域内的存储位置(插槽) [13]。此外,还使用分槽方法将产品分配到 DC 中的存储位置[14]。

高滨等人。 [15]使用基于模拟的优化模型实现了一种支持有关存储位置分配决策的方法。赫拉古等人。 [16]开发了一种数学模型和启发式算法,用于解决考虑不同大小存储区域的 DC 的槽位问题或产品分配问题。侯等人。 [17]详细阐述了使用仓库管理系统(WMS)在存储地点进行存储分配和重新分配产品的模型,以便有效地执行上架操作,尽管与我们的提案不同,该方法没有考虑上架路由。后来,Kutzelnigg [18]实现了混合整数规划公式和启发式方法来解决 DC 中的时隙问题。使用启发式方法表示并解决了上架订单批量问题[19],但本研究中的路由问题并未与上架订单批量问题集成。同样,使用经典的禁忌搜索[20]解决了基本的上架路线问题,但是,本文没有考虑一组物料搬运设备(MHE)、多种产品和具有不同高度的多并行货架系统。

关于 PRP 的解决方法,粒子群优化 (PSO)方法由于其快速发展、易于实现、快速收敛和需要调整的粒子很少而成为许多优化问题的合适优化算法[21]。此外,它比其他元启发式算法(例如遗传算法(GA)、蚁群优化(ACO)或禁忌搜索(TS))更适合处理一些优化问题[21-24]。事实上,PSO 已成功应用于解决复杂的优化问题,例如物流和仓储流程等不同领域的组合和分配问题。与其他方法相比,在实现离散 PSO 求解 PRP 时不存在重叠和变异计算,这可以被视为一个优点。Bai [21]描述了离散 PSO 如何受到部分乐观的影响,这使得调节粒子的速度和位置变得困难。最后一个问题被认为是离散 PSO 的缺点,但其优点是与其他元启发法相比易于表示和计算效率高。

有相关论文提供了车辆路径问题 (VRP) 中离散 PSO 实现的文献综述。陈等人。[25]开发了一种离散 PSO,用于使用全局搜索和局部搜索来解决容量车辆路径问题 (CVRP),考虑卡车车队以最小化总运输成本。戈克萨尔等人。[22]描述如何实现离散 PSO 来解决供应链中的组合优化问题,例如旅行销售问题 (TSP)、调度问题和 VRP;甚至还开发了用于同时取货和送货的 VRP 的离散 PSO (VRPSPD)。此外,考虑到卡车车队负载能力的限制,采用排列编码来表示VRPSPD问题的解决方案。龚等人。[26]开发了一种基于集合的PSO来解决有关VRP时间窗 (VRPTW)的离散组合优化问题,并将经典PSO在连续空间中的实值位置转换为整数值来表示离散PSO的路线。另一方面,龚等人。[26]描述了一种方法,离散 PSO 为 Solomon 的 VRPTW 基准生成了最著名的结果,事实证明该方法能够实现解决此类路由问题的高性能。沃等人。[27]使用诸如使用前推插入启发式 (PFIH)初始化群体、速度和位置更新、重新定义过去最佳位置 (pbest)更新操作以及使用目标等技术实现了用于求解 VRPWT 的离散 PSO用于测量车辆路线总成本的函数。结果,与蚁群优化 (ACO) 相比,离散 PSO 解决路由问题的效率提高了 30.9%。

同样,Alinaghian 等人。[28]考虑到交通条件,实施了离散 PSO 来解决城市物流系统中的时间相关 VRP (TDVRP)。离散 PSO 通过粒子的协作为 VRP 问题提供了最佳解决方案,并且由于时间差异在0 到 8%之间,因此与分支定界 (方法)相比,它产生了良好的性能。

戈麦斯等人。[11]针对经典的异构车辆路径问题 (HVRP),对拣选操作中的订单批量和路径问题进行了比较分析,解决了仓库和配送中心中的此类问题。这些先前的结果保证了离散 PSO 对 VRP 问题及其变体产生令人满意的结果,为此类问题提出了一种有前途的方法。Zhu 和 Hu [29]建立了绿色 TSP 模型以最小化燃料消耗成本;他们考虑了交通拥堵,并通过结合遗传算法和 PSO,作者大大降低了燃料消耗。德里迪等人。[30]提出了一种基于 PSO的算法来解决考虑多车辆、多个站点以及带时间窗的取货和送货问题的VRP,旨在最小化总行驶距离;他们通过减少几个研究实例的行驶距离获得了更好的结果。

另一方面,解决 PRP 可以支持决策者确定批量订单和执行仓库入库操作路线的最佳方式。PRP 解决方案预计将减少行程时间、MHE 使用时间以及服务给定工作量所需的工作时间,从而改善仓库管理的经济、环境和社会维度,并支持实现可持续供应链[31]。甚至PRP

解决方案算法可以集成到灵活的库存管理、仓库管理、并且可以成为增强现实等网络物理系统的输入,运营和运营管理系统可以利用该系统来优化供应链中的流程[32],并且可以轻松定位上架操作中涉及物品和存储位置[33]。网络物理系统(例如增强现实)的输入,操作人员可以通过它轻松定位。从文献综述中可以看出,关于离散粒子群算法求解PRP的论文中涉及到上架操作的物品和存储位置[33]。尚未确定,因为检测到的研究主要集中在VRP及其不同变体上,并且从文献综述中可以看出,有关离散PSO求解PRP的论文已经上,它们主要应用于供应链内的运输和分配系统,而不是放置-尚未被识别,因为检测到的研究集中在VRP及其不同变体仓库中的远程操作。因此,我们的论文通过提出弥补了文献中的一些空白,它们主要应用于供应链内的运输和分销系统,而不是考虑非托盘式货架系统(3D而非仓库中的上架操作)的DC的上架路径问题(PRP)。因此,我们的论文通过以下方式弥补了文献中的一些空白:多种同质物料搬运设备(MHE)和多种产品,为考虑非托盘式货架系统的配送中心提出入库路径问题(PRP)被处理。在上述文献中尚未发现这种PRP方法。(3D仓库)、多个同质物料搬运设备(MHE)和多个产品。此外,所提出的PRP是使用离散PSO算法求解的,该算法与要处理的几个算法进行比较。在上述文献中尚未发现这种PRP方法。禁忌搜索方法(经典禁忌搜索(CTS)、禁忌搜索(TS)2-Opt)和经验规则。此外,所提出的PRP是使用离散PSO算法求解的,该算法与几种算法进行了比较。在文献中尚未找到这些元启发法和经验规则来解决PRP。禁忌搜索方法(经典禁忌搜索(CTS)、禁忌搜索(TS)2-Opt)和经验规则。据我们所知,本文是最早讨论PRP的文献之一。在文献中尚未找到这些元启发法和经验规则来解决PRP。至据我们所知,本文是最早讨论PRP的文献之一。

3. 问题描述和建模

3. 问题描述和建模

在本节中,提出问题描述及其数学建模。

3.1.问题描述3.1.问题描述

上架路线问题(PRP)是针对具有两个交叉通道的传统多平行通道仓库布局制定的。这种类型的仓库被归类为非托盘化仓库。上架路线问题(PRP)是针对传统的多平行通道制定的。货架系统(3D仓库)由于要存储的物流物品是箱子、包裹等,仓库布局有两个交叉通道。此类仓库属于非托盘式货架并且它们是手动管理的。由于要存储的物流物品为箱子、包裹等,因此在多高度系统(3D仓库)中,每个通道都有多个存储位置。每个通道都有多个不同高度的存储位置(见图1)。

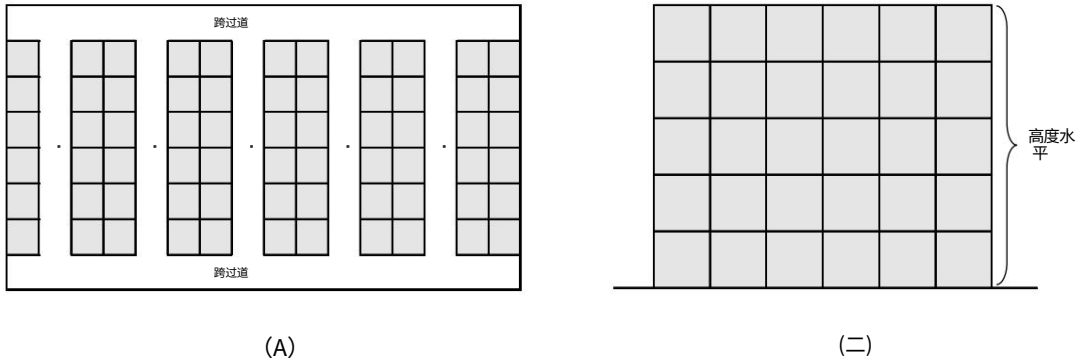


图1. (a)仓库的俯视图和(b)平行通道的前视图。

使用物料搬运设备将产品放置在预先分配的存储位置。使用物料搬运设备将产品放置在预先分配的存储位置。收到的要入库的产品链接到到达文档。每个到货单由产品识别码和要存储的产品数量以及由产品识别码和要存储的产品数量以及特定的具体特征(例如温度、产品性质、相对湿度、有效期、诸如温度、产品性质、相对湿度、有效期等特征。产品使用上架清单进行分配,其中上架清单是由其他的。产品使用入库清单进行分配,其中入库清单是由WMS WMS根据一组到货单据的信息创建的。基于一组到达文件的信息。上架路线由一系列要访问的存储位置形成,的产品。上架路线由一系列要访问的存储位置形成。每份到货文件或上架清单的产品必须分配到一条路线。通常,一套存放每份到达文件或上架清单必须分配给一条路线。通常,根据同质MHE的负载和体积容量约束生成一组上架路线。路线是根据同质MHE的负载和容量限制以及要分配的产品数量生成的。此外,昂贵且有限的物流资源,例如要分配的产品数量。此外,昂贵且有限的物流资源(例如MHE、MHE、密集劳动力和ICT)通常用于执行上架操作(卸货、劳动力密集,信息通信技术通常用于执行入库操作(卸载、检查、搬运等)。因此,PRP必须在最短的时间内进行检查、处理等)。因此,PRP必须在最短的时间内以基于效率的方法进行。敏捷的上架操作改善了存储的补充基于效率的方法。敏捷的上架操作可改善存储位置的补给,这对有效的库存管理和配送中心的绩效产生积极影响。为此,将最小运行时间设置为问题的目标函数。

地点,这对有效的库存管理和配送中心的绩效产生积极影响。为此,将最小运行时间设置为问题的目标函数。

PRP 允许为每个产品分配任何可能的存储位置,代表随机存储策略。WMS 是用于说明产品位置的信息系统,关注可用性和物流限制(例如,负载能力、体积、产品之间的非交叉污染)。WMS 输出被视为 PRP 的已知输入。必须注意的是,上架时间取决于分配给每个产品的存储位置。另一方面,该 PRP 考虑了一组同质 MHE。该车队由具有相同负载和容积、行驶速度和最大举升高度的同质 MHE 组成。此外,MHE在 DC 中执行垂直和水平移动,并且只有一个 MHE 被分配给上架路线。

这个问题很复杂,因为链接到到货文档的多个产品必须分配到 DC 每个工作班次中指定的存储位置。因此,必须使用元启发法创建一组上架路线,以便在最短的时间内执行操作。必须采用货位方法来分配多层货架存储系统中的存储位置,这直接影响入库路线。最后,使用产品组合来解决这个问题,该产品组合由不同重量、体积和尺寸的产品组成。

尽管 PRP 与拣货操作有一些相似之处,但它们在目标函数、决策变量和约束方面存在差异。关于拣选路线问题中的目标函数和决策变量,这些函数旨在找到尽可能短的操作时间、最小的延迟和最高水平的客户服务,因为它们面向供应链中的出库物流[34-36]。订单拣选受到操作执行时库存可用性的限制,而 PRP 则受到货架系统中存储位置的限制。此外,由于PRP同时考虑货位和路径问题,搜索空间的结构和路径集与订单分批、排序和路径等订单拣选问题的结构不同[3,37]。

3.2.问题表述

我们为 PRP 模型制定定义以下假设:

·每个产品都分配到一个存储位置。这种分配是根据产品类型、体积、重量、易碎性等,根据产品之间的存储兼容性进行的。·存在一组具有相同速度和可用负载能力特征的同类车辆 (MHE) ,并且每个车辆都会被分配到特定的路线。在某些MHE未被使用的情况下,空闲的MHE将被分配到以车辆段为始发地和目的地的虚拟航线。

优化上架路径问题 (PRP)的指标、集合、数据和数学模型公式如下。

|                 |  |
|-----------------|--|
| 索引和集合:          |  |
| $e, f \in N$    | 储存地点。该集合包括充当路线起点和终点的站点 (每条路线的第一个和最终节点)   |
| $G \subseteq N$ | 位置的存储子集 上架路线。候选路线的集合与可用的MHE的数量相关联。因此,车场内有与MHE一样多的候选路线,再加上一条以该车场为起点和终点的虚拟路线来代表MHE未被使用的情况。 |
| $c \in C$       |  |
| $i \in I$       | 我收到的产品要收起来。  |

数据：  
定义 存储位置 e 和 f 之间的距离。  
在 每个 MHE 的行驶速度 (m/s)。  
详细地讲 每个 MHE 的可用负载能力。  
与一个 以要存放的产品的单位表示的产品数量。  
在 在手动拣选仓库中，  $b_i < LC$  允许手动处理产品盒。  
变量： 产品 i 被分配到存储位置 e。请注意,此分配是预定义的  
它是根据产品特性（重量、体积等)来完成的。

厕所 = 1、如果在路径  $c \in C$  中位置 e 之后立即访问存储位置 f  
如果 0, 否则  
和  $z_n^c$  = 1、如果产品 i 被分配到路线  $c \in C$   
0, 否则  
麦克  $_{ce}$  = 1、如果在路线  $c \in C$  中访问了位置 e  
0, 否则

模型：

最小  $\sum_{c \in C, e, f \in N} \frac{d_{ef}}{v_c} \cdot \text{厕所}_{ef}$  (1)

和  $z_n^c = 1, \forall i \in I, c \in C$  (2)

会  $\sum_{i \in I} z_n^c \leq LC, \forall c \in C$  (3)

厕所  $_{ef} = \text{麦克}_{ce}, \forall c \in C, e \in N$  (4)  
 $f \in N, fe$

厕所  $_{eff} = \text{麦克}_{ef}, \forall c \in C, f \in N$  (5)  
 $e \in N, \text{如果}$

厕所  $_{eff} \geq \text{麦克}_{ce}, \forall c \in C, G \subseteq N$  (6)  
 $fe \in G, ee \in NG$

麦克  $_{ce} \geq \text{添加}_i^c, \forall c \in C, e \in N, i \in I$  (7)

厕所  $_{ef}$  和  $z_n^c$  麦克  $_{ce} = \{0, 1\} i,$  (8)

等式 (1)中的目标函数旨在最小化集合的总存放时间  
设计路线的数量,以自处理时间以来到存储地点的行驶时间来衡量  
给定预先分配饼图的位置是一个常量值。等式 (2)中的约束确保  
将每个产品 i 分配给仅一条路线  $c \in C$ ,该路线将与 MHE 之一相关联。  
等式 (3) 中的约束确保 MHE 的负载能力不会被超过  
分配给路线  $c \in C$  中车辆的产品数量。方程 (4)和 (5)中的约束确保  
每个存储位置在上架路线中都有一个前任位置和一个后继位置。注意  
路线的第一个节点将以车站作为前驱,最后一个节点将以车站作为前驱  
作为继任者。等式 (6)中的约束避免了 G 存储位置集中的子旅行,这将给出  
断开路线的地方。这是每个车辆路线中常见且强制性的约束  
问题。等式 (7)中的约束确保存储位置 e 在上架过程中被访问  
如果具有该存储位置的一组产品 i 被分配给路线 c,则路线 c。等式 (8)中的约束  
确保问题的变量是二元的。



4. 解决上架路由问题 (PRP)的方法

上一节制定的数学模型可以进行大规模优化二元决策变量问题。这一事实导致计算的实现情报方法比精确的数学方法更有效。在这一行中,这一节显示了为求解 PRP 而制定和实现的离散 PSO。基准方法命名为禁忌搜索元启发式 (经典禁忌搜索 (CTS)、禁忌搜索 (TS)2-Opt)和经验提出了评估离散 PSO 性能的方法 (经典禁忌搜索 (CTS)、禁忌搜索 (TS)2-Opt)和经验规则来评估离散 PSO 的性能。

7 共 16 个

4.1.小节

4.1.1.小节 PSO 是一种基于进化技术的元启发式方法,它使用基于群体的地表示。PSO 是一种基于进化技术的元启发式方法,它使用群体智能算法[38,39]。建立离散 PSO 来适当地表示和速度值;解决为方案空间的结构和一组上架路线,以及位置和速度,因为经典的 PSO 元启发式算法用于解决具有连续解决方案空间的问题,并且运算符,因为经典的 PSO 元启发式用于解决粒子的连续解连续编码方案的问题。我们采用的方法是实施离散的粒子的空间和连续编码方案。我们采用 PSO 算法来求解所提出的 PRP 的方法如图2 所示。

图 2 显示了实施离散 PSO 算法来求解所提出的 PRP 的情况。

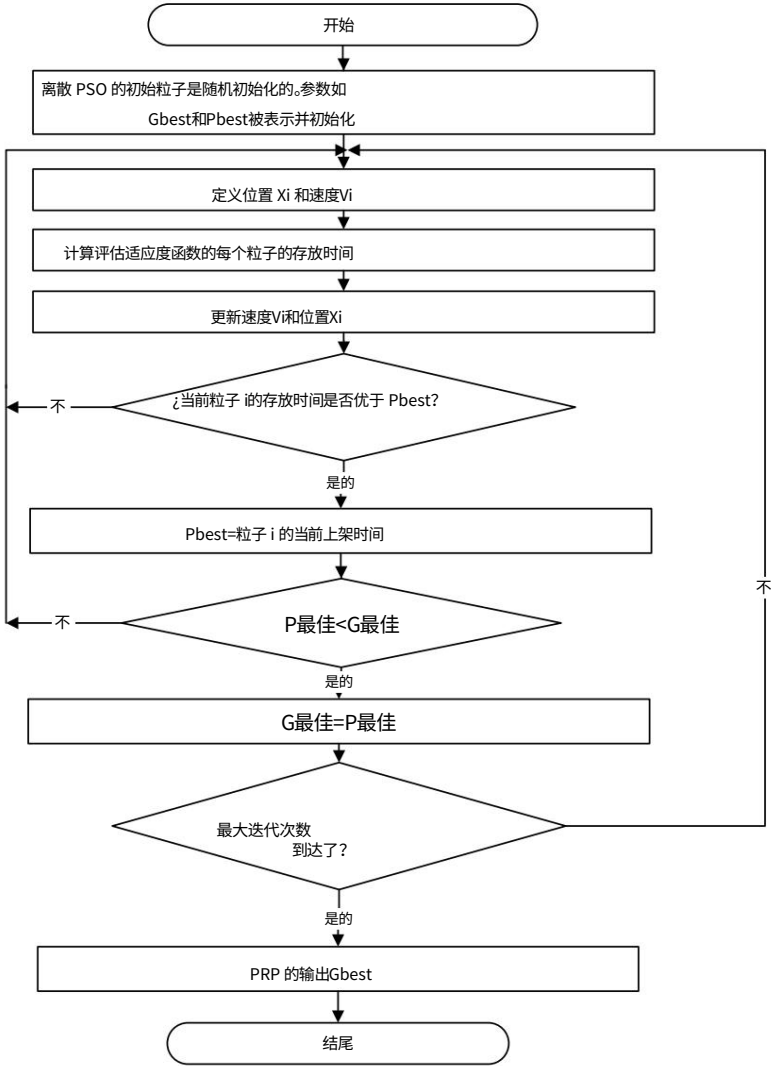


图 2.入库路径的离散粒子群优化 (PSO) 流程图图 2.入库路径的离散粒子群优化 (PSO) 流程图问题 (PRP)。

4.1.1.1. PSO 初始粒子集的生成

通过实施 FIFO 优先级规则来创建一组初始上架路线,该规则考虑K 个同质 MHE 的可用性和容量,以及要在存储位置分配的产品。请注意,上架路线 $c \in C$ 由一系列存储位置 $e \in N$ 组成,这些存储位置将被访问以使用 MHE 放置一定数量 $(b_i)$ 的产品。

#### 4.1.1. PSO 初始粒子集的生成

通过实施 FIFO 优先级规则来创建一组初始上架路线,该规则考虑了 K 同质 MHE 的可用性和容量,以及要在存储中分配的产品地点。请注意,上架路线  $c \in C$  由一系列存储位置  $e \in N$  组成,

离散PSO的粒子,这些粒子由一组存放路径 (SPR) 形成。离散PSO的每条路线都有粒子,这些粒子由一组上架路线 (SPR)组成。集合SPR具有被分配来服务N个存储位置以存放所分配的产品的MHE。集合SPR具有被分配来服务N个存储位置以存放所分配的产品的应用。每个存储位置都是一个命名离散点,用值 0 或 1 进行编码。如果每个存储位置都是一个命名离散点,值为 1 则该存储位置被分配给属于 SPR 的路由 $c \in C$ ,否则为 1 则该存储位置被分配给属于 SPR 的路由 $c \in C$ ,否则值为 0。值为 0。要访问一组 12 个存储位置以执行放置操作的粒子示例 - 要访问一组 12 个存储位置以执行放置操作的粒子示例。上架操作如图3所示。Depot (D) 上架路线 $c \in C$  的起点和终点位于同一地点,如图3所示。上架路线 $c \in C$  的起点和终点位于 DC 的仓库 (D)。直流电。

|       |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| c1    | 德e111    | e2    | e3    | e4    | e5    | e6    | e7    | e8    | e9    | e10   | e11    | e12D01 |
|       |          | 0     | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0      | e12D   |
| c2    | 从1       | e2    | e3    | e4    | e5    | e6    | e7    | e8    | e9    | e10   | e11    |        |
|       | 101      |       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 1      | 1      |
| ..... | D        | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | .....  | .....  |
|       | 1        | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | .....  | .....  |
| 抄送    | 德e1e2100 | e3    | e4    | e5    | e6    | e7    | e8    | e9    | e10   | e11   | e12D01 |        |
|       |          | 1     | 0     | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     |        |        |

图 3.离散 PSO 的粒子编码方案。

此外,每个粒子都有一个位置 $X_i$ 和一个速度 $V_i$ ,链接到存储位置 $e \in N$ 。每个粒子都有一个位置 $X_i$ 和一个速度 $V_i$ ,链接到存储位置 $e$ 。属于每条路线 $c_i \in C$ 。在这一步中,参数 $G_{best}$ ,  $P_{best}$ ,位置 $X_i$ 和速度 $V_i$ 初始化离散 PSO 元启发式。确定初始化离散 PSO 元启发式。

#### 4.1.2. 粒子位置的定义

每个粒子  $(x_i)$  的位置使用以下表达式表示 (等式 (9) 和 (10))。

$$x_i = x_0 \times x_1 \times \dots \times x_n \quad (9)$$

$$= \quad (9)$$

$$X_n = \{(e, l), (l, f) | e, f \in \{0, 1, \dots, l-1, l+1, n\}, ef = (, ), (, ), , \} \quad (10)$$

$$\varepsilon \in 0, 1, \dots, -1, +1, \quad \neq \quad (10)$$

在哪里：

其中:  $k_i$  : 产品  $i$  在维度  $l$  中的位置 (存储位置)。这个维度是由圆弧构成的  
 $l_i$  : 产品  $i$  在尺寸  $l$  中的位置 (存储位置)。该维度由与当前存储位置  $l$  相邻的弧形成。

与当前存储位置 $l$ 相邻。 $l$ :入库路线内当前要访问的存储位置(节点)。 $e$ :位置 $l$ 的先前存储位置。 $e$ :位置 $l$ 的先前存储位置。 $f$ :位置 $l$ 的后续存储位置。 $f$ :位置 $l$ 的后续存储位置。 $n$ :(DC)的存储位置(节点)的数量。 $n$ :(DC)的存储位置(节点)的数量。

### 4.1.3.粒子速度的定义

#### 4.1.3. 粒子速度的定义

粒子速度  $i(V_i)$  使用表达式 (方程 (11) 和 (12)) 定义

粒子 $i$  ( $V_i$ )的速度使用表达式 (方程 (11)和 (12)) 定义

$$= \frac{V}{\dots} = V \quad \text{在}^d \quad (11)$$

$$\exists ()()x=i \text{ 在 } d = a/p(a) \text{ (} a \in A \text{)} \quad d \quad (12)$$

哪里哪

**a**: 连接存储位置内的两个存储位置的弧。  $p(a)$ : 第  $d$  维中分量  $a \in A$  的概率, 以存储位置之间的距离与总距离的比例来衡量。  $d$ : 第  $d$  维是与粒子位置相关的特定存储位置  $l$  (当前节点) 的一组相邻弧。  $\mathcal{A}$ : 由  $d$  维相关的弧集形成的搜索空间。



$p(a)$ :第  $d$  维中分量  $a \in A$  的概率,以存储位置之间的距离与总距离的比例来衡量。 $d$ :维度  $d$  是与特定存储位置  $l$  (当前节点) 关联的一组相邻弧

与粒子  $X$  的位置

那。

$A^d$ :由与维度  $d$  关联的弧集形成的搜索空间。

#### 4.1.4.每个粒子的存放时间 $r$ (适应度函数)

通过实现目标函数 (方程 (1)) ,计算链接到路线  $c \in C$  的每个粒子  $r$  的存放时间。然后,计算每条路线  $c \in C$  的上架时间,然后将其相加以计算该组路线的总上架时间。存放时间以分钟为单位。

#### 4.1.5.离散 PSO 的速度更新

根据[26,27]提供的建议,使用方程 (13) - (18) 执行速度更新。

$$\omega \cdot v_i^d = (a)/p(a) \quad (a) \in A^d \quad (13)$$

$$p(a) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } \omega \cdot p(a) > 1 \\ \omega \cdot p(a) & \text{否则} \end{cases} \quad (14)$$

$$v_i^d + V^d = (a)/\max(p_i(a), p_i(a)) \quad (a) \in A^d \quad (15)$$

$$X_i^d - X_h^d = T \quad (a) \in X^d \text{ 的 } (a) \in X^d \quad (16)$$

$$\omega \cdot T = (a)/p(a) \quad (a) \in A^d \quad (17)$$

$$p(a) = \begin{cases} \text{if } a \in T \text{ 且 } d \text{ 且 } \omega > 1, \\ \in T & 1 \geq \omega \geq 0, \text{ if } a \\ 0, \text{ 如果 } T & d \end{cases} \quad (18)$$

在哪里:

$i$  和  $h$ :粒子  $i$  和  $h$  在  $d$  维度上的索引。 $a$ :连接存储位置内的两个存储

位置的弧。 $p(a)$ :第  $d$  维中分量  $a \in A$  的概率,用于表示存储位置之间的距离与总距离的

比例。 $p(a)$ :第  $d$  维中分量  $a \in A$  用于更新速度的概率。

$X_i^d - X_h^d$ :离散 PSO 的第  $d$  维中粒子  $i$  和  $h$  的位置相减。 $\omega$ :用于更新离散 PSO 速度的参数,范围从 0 到 1 [0, 1]。 $h$ :离散 PSO 的第  $d$  维中粒子  $i$  和  $h$  的速度总和。

维  $d$

$A^d$ :用于更新第  $d$  维速度的弧集,该弧集与为离散 PSO 定义的粒子相关。

速度更新 (方程 (13) - (18)) 是根据速度 ( $v_i^d$ ) 和位置 ( $X_i^d$ ) 粒子  $i$  在第  $d$  维中。在离散 PSO 中,速度更新由带有因子  $\omega$  和粒子  $i$  速度的算子表示 ( $v$  和位置减法 ( $X^d$  维))。因此,位置更新与离散粒子  $i$  的速度直接相关 PSO 式 (19) 用于位置更新:  $v_i^d$ , 命名为 ( $\omega \cdot (v_i^d - X_h^d)$ ), 加上速度 ( $v_i^d + V_h^d$ ),  $d - X_h^d$  与形成粒子  $i$  的存储位置相关联

$$\text{更新五} = (a)/p(a) \in V \text{ 的 } \text{且 } p(a) \geq P \text{ (随机)} \quad (19)$$

在哪里:

$P(\text{random})$ :随机数,范围从 0 到 1 [0, 1]。

Updt  $V_i^d$ :第  $d$  维中粒子  $i$  的速度转换为时间集以进行更新  
离散 PSO 的位置。

#### 4.1.6.停止标准

当达到最大迭代次数时,算法结束。如果这个条件已达到,则 PSO 元启发法结束,并且Gbest被声明为 PRP 的解决方案。

#### 4.2.禁忌搜索元启发法

经典禁忌搜索和结合禁忌搜索和 2-Opt 算子的混合方法 (称为 TS 2-Opt)用于对 PRP 进行排序。选择这些元启发法是因为它们允许处理 NP 难题,例如 PRP。TS 元启发法被证明是解决 DC 中的拣选器路由问题的好方法[40]。

CTS 元启发式实现了经典组件,例如解决方案结构 (存放路线)、禁忌列表、目标函数、交换和移位运动以及 PRP 的停止标准。同时,TS 2-Opt 与 CTS 的主要区别在于实现了双重交换和移位动作,旨在提高解决方案空间的探索效率,生成最短时间的上架路线。CTS 和 TS-2-Opt 是解决 PRP 的新颖方法,因为在上架操作的文献中没有找到元启发法来解决这个问题。此外,CTS 和 TS-2-Opt 也被用作解决拣货路径问题的基准元启发法,因为它们被证明对此类问题具有良好的性能[40]。但请注意,订单拣选和入库操作在目标函数及其约束方面存在差异 (MHE、多种产品、非托盘货架系统)。

#### 4.3.经验法则 FPNP

除了禁忌搜索方法之外,还实施了一种称为最远位置和最近位置 (FPNP)的经验规则来解决商业环境中的 PRP [23,40,41]。

该路由规则开始将产品放置在距离仓库最远的分配存储位置,并继续将产品存放到距离仓库最近的存储位置。该路由规则仅生成一个解决方案,该解决方案是使用上述逻辑创建的。

### 5. 实验研究

在本节中,我们介绍实验研究;它允许将 PSO 的性能与其他元启发法和 FPNP 启发法进行比较。总上架路线时间设置为响应变量。

上架路线问题是针对归类为中型仓库的传统多平行通道布局制定的。该布局由400个存储位和6条平行通道组成,每个通道都有不同高度的存储位。使用物料搬运设备将产品放置在指定的存储位置。该问题代表了一组同质 MHE。车队由多台具有相同载重量、行驶速度和最大举升高度的移动设备组成。

计划采用全因子设计  $4 \times 4 \times 3 \times 2$  来执行实验分析。选择这种实验设计(DOE) 是因为因子水平的组合是随机执行的。因素水平的组合生成了一组问题来研究元启发法 (离散 PSO、CTS和 TS 2-Opt)和经验规则 (FPNP) 的性能。本实验研究所开发的元启发法的实验条件、因子水平和响应变量如表1和表 2所示。

表 1. PRP 的实验研究。

| 成分         | 价值                |
|------------|-------------------|
| 实例、问题集     | 96                |
| 按问题重复      | 20                |
| 运行次数或总重复次数 | 1920年             |
| 响应变量       | 总平均上架路径时间         |
| 叉车承载能力     | 2.665 公斤 (1.4立方米) |
| 行驶速度       | 146.33米/分钟        |
| 最大升力       | 5米                |

表 2. PRP 的实验因素。

| 系数 (F)               | 级别数 | 因素水平                       |
|----------------------|-----|----------------------------|
| F1:路由方式 (RM)         | 4   | FPNP; CTS; TS 2-选项;离散粒子群算法 |
| F2:上架清单尺寸 (PLS) (单位) | 4   | 100; 250; 400; 600         |
| F3:仓库                | 2   | 左边;中心                      |
| F4:MHE 机队规模 (FMHE)   | 3   | 1; 2; 4                    |

元启发法和 FPNP 规则使用 JAVA® 进行编码。CTS 和 TS 的任期列表 2-Opt 等于 7。对于离散 PSO,参数 $\omega$ 等于 0.7 ( $\omega = 0.7$ )。其他因素, a.p(a)、p(a)、Td等是根据PRP存储位置的弧线集合来设置的。元启发法的参数是根据 1000 次实验测试的分析确定的对于 CTS、TS 2-Opt 和离散 PSO;他们是根据那些产生最好的测试来选择的。使用总上架时间作为响应变量的 PRP 结果。之间的差异所选参数和其他实施的参数分别占总库存量的 5% 和 7% 左右次,分别。实验运行在配备 Pentium VII 处理器的 PC 上进行 2 GB 内存。

建立了四个基准治疗来评估 CTS、TS 2-Opt 和离散粒子群算法。基准之间的差异在于上架清单的大小。

- 基准处理1:FPNP (路由策略)、1 个MHE 和中心 (仓库)和100 个产品 (入库清单大小)
- 基准处理2:FPNP (路由策略)、1 个MHE 和中心 (仓库)和250 个产品 (入库清单大小)
- 基准处理3:FPNP (路由策略)、1 个MHE 和中心 (仓库)和400 个产品 (入库清单大小)
- 基准处理4:FPNP (路由策略)、1 个MHE 和中心 (仓库)和600 个产品 (入库清单大小)

6. 结果与讨论

实验场景的结果如表3 所示。实验由以下组成：四个因素包括路线方法、上架清单大小、仓库和 MHE 数量。此外，总的平均上架路线时间 (分钟)和性能节省用作响应这个问题的变量。请注意,96 个问题中的每一个都执行了 20 次重复，提供 1920 次运行 (总重复次数)以确保实施分析的统计有效性全因子设计  $4 \times 4 \times 3 \times 2$  的方差 (ANOVA)。

表 3. PRP 实验结果。

| 收起来<br>列表大小 | 机队规模<br>的 H.E. | 车厂:中心  |        |          |        | 仓库:左   |        |          |        |
|-------------|----------------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|
|             |                | FPNP   | CTS    | TS 2-Opt | 离散 PSO | FPNP   | CTS    | TS 2-Opt | 离散 PSO |
| 100         | 1              | 1123.8 | 830.3  | 810.3    | 781.7  | 1190.3 | 837.7  | 815.5    | 786.0  |
|             |                | 0%     | -26%   | -28%     | -30%   | 6%     | -25%   | -27%     | -30%   |
|             | 2              | 626.3  | 377.4  | 354.3    | 357.6  | 639.3  | 383.7  | 359.7    | 345.9  |
|             |                | -44%   | -66%   | -68%     | -68%   | -43%   | -66%   | -68%     | -69%   |
| 250         | 4              | 425.1  | 240.5  | 215.1    | 209.1  | 457.8  | 245.6  | 222.4    | 214.3  |
|             |                | -62%   | -79%   | -81%     | -81%   | -59%   | -78%   | -80%     | -81%   |
|             | 1              | 2767.4 | 2297.5 | 2265.2   | 2157.6 | 2779.1 | 2304.1 | 2270.9   | 2167.0 |
|             |                | 0%     | -17%   | -18%     | -22%   | 0%     | -17%   | -18%     | -22%   |
| 400         | 2              | 2097.7 | 1881.0 | 1715.8   | 1696.1 | 2108.5 | 1886.1 | 1721.4   | 1702.7 |
|             |                | -24%   | -32%   | -38%     | -39%   | -24%   | -32%   | -38%     | -38%   |
|             | 4              | 1589.4 | 1415.8 | 1300.6   | 1300.6 | 1596.0 | 1421.4 | 1306.3   | 1306.3 |
|             |                | -43%   | -49%   | -53%     | -53%   | -42%   | -49%   | -53%     | -53%   |
| 600         | 1              | 4044.8 | 2820.1 | 2773.3   | 2656.9 | 4053.3 | 2822.0 | 2779.9   | 2662.6 |
|             |                | 0%     | -30%   | -31%     | -34%   | 0%     | -30%   | -31%     | -34%   |
|             | 2              | 3480.2 | 2331.6 | 2256.9   | 2183.6 | 3492.9 | 2338.2 | 2261.6   | 2193.6 |
|             |                | -14%   | -42%   | -44%     | -46%   | -14%   | -42%   | -44%     | -46%   |
|             | 4              | 2430.4 | 1710.3 | 1566.6   | 1457.3 | 2440.9 | 1716.4 | 1572.2   | 1463.9 |
|             |                | -40%   | -58%   | -61%     | -64%   | -40%   | -58%   | -61%     | -64%   |
|             | 1              | 5519.8 | 4088.7 | 4040.9   | 3922.2 | 5347.1 | 4090.6 | 4047.7   | 3928.0 |
|             |                | 0%     | -26%   | -27%     | -29%   | -3%    | -26%   | -27%     | -29%   |
|             | 2              | 4745.9 | 3573.9 | 3497.6   | 3422.9 | 4758.9 | 3580.6 | 3502.5   | 3433.0 |
|             |                | -14%   | -35%   | -37%     | -38%   | -14%   | -35%   | -37%     | -38%   |
|             | 4              | 3553.1 | 2818.3 | 2671.0   | 2560.0 | 3563.7 | 2824.0 | 2677.0   | 2566.9 |
|             |                | -3.6%  | -49%   | 6.52%    | 1.54%  | -35%   | 6.49%  | 4.51%    | -53%   |

基于 1920 次实验运行的结果,发现离散 PSO 生成最好的 PRP 的一组上架路线,因为它可以将总平均上架时间减少 30% 到 81% 与 FPNP 经验规则相比。离散 PSO 与 TS 2-Opt 的时间差更小,因为它在 3.2% 到 3.5% 之间变化,因此可以产生良好的性能来求解 PRP。同时,离散 PSO 和 CTS 之间的时间差异更大,因为它的差异为 5.8% 到 8.2%。

检查全因子设计  $4 \times 4 \times 3 \times 2$  获得的方差分析 (ANOVA) 检测响应变量的显着主效应和双向交互效应 (表4)。

三个主要效应和两个双向相互作用效应被认为具有统计显着性方差分析,因为 p 值小于 0.05。请注意,具有较高均值的显着影响 Square (MS) 通常会生成较短的总平均上架时间。因此,组合这些显着影响的因子水平被设置为 PRP 的解决方案。如果某个因素很重要在双向交互效应中,必须分析它而不是其主效应。因此,有用于分析统计数据的主效应和交互效应之间的重要性层次 PRP 的结果。

表 4. PRP 全因子设计的方差分析。

| SV       | FD | SC        | 多重比较校正   | F值      | p 值    |
|----------|----|-----------|----------|---------|--------|
| 模型       | 95 | 318109503 | 3348521  | 203.05  | <0.001 |
| R M      | 3  | 20109061  | 6703020  | 406.46  | <0.001 |
| 最小二乘法    | 3  | 248838126 | 82946042 | 5029.75 | <0.001 |
| FMHE     | 2  | 37708458  | 18854229 | 1143.30 | <0.001 |
| 仓库       | 1  | 1035      | 1035     | 0.06    | 0.80   |
| RM×PLS   | 9  | 6311084   | 701232   | 42.52   | <0.001 |
| RM×FMHE  | 6  | 771732    | 128622   | 7.80    | <0.001 |
| RM×仓库    | 3  | 115       | 38       | 0.00    | 1.00   |
| PLS×FMHE | 6  | 4095223   | 682537   | 41.39   | <0.001 |
| PLS×仓库   | 3  | 2703      | 901      | 0.05    | 0.98   |

表 4.续

| SV          | FD    | SC        | 多重比较校正 | F值   | p 值  |
|-------------|-------|-----------|--------|------|------|
| FMHE×仓库     | 2     | 第830章     | 第415章  | 0.03 | 0.97 |
| RM×PLS×FMHE | 18    | 237908    | 13217  | 0.80 | 0.69 |
| RM×PLS×仓库   | 9     | 9616      | 1068   | 0.06 | 1.00 |
| RM×FMHE×仓库  | 6     | 2521      | 420    | 0.03 | 1.00 |
| PLS×FMHE×仓库 | 6     | 5860      | 977    | 0.06 | 0.99 |
| 错误          |       | 1583144   | 16491  |      |      |
| 全部的         | 96191 | 319692647 |        |      |      |

机队规模 (FMHE) 与路由方法 (RM)、机队规模 (FMHE) 的双向交互作用  
按上架清单大小 (PLS) 和按上架清单大小 (PLS) 划分的路由方法 (RM) 进行统计  
 $\alpha$  值为 0.05 时显着。因此,这些相互作用对  
响应变量,并对它们进行分析以评估因素和影响的差异和影响

他们的平均总上架时间水平。此外,还评估了 PRP 的显着交互作用,以确定产生最短可能的因子水平组合  
评估 PRP 以确定在 DC 中产生尽可能短的上架时间的因素水平组合。双向交互效应图如图4 所示。  
DC 的存放时间。双向交互效应图如图 4 所示。

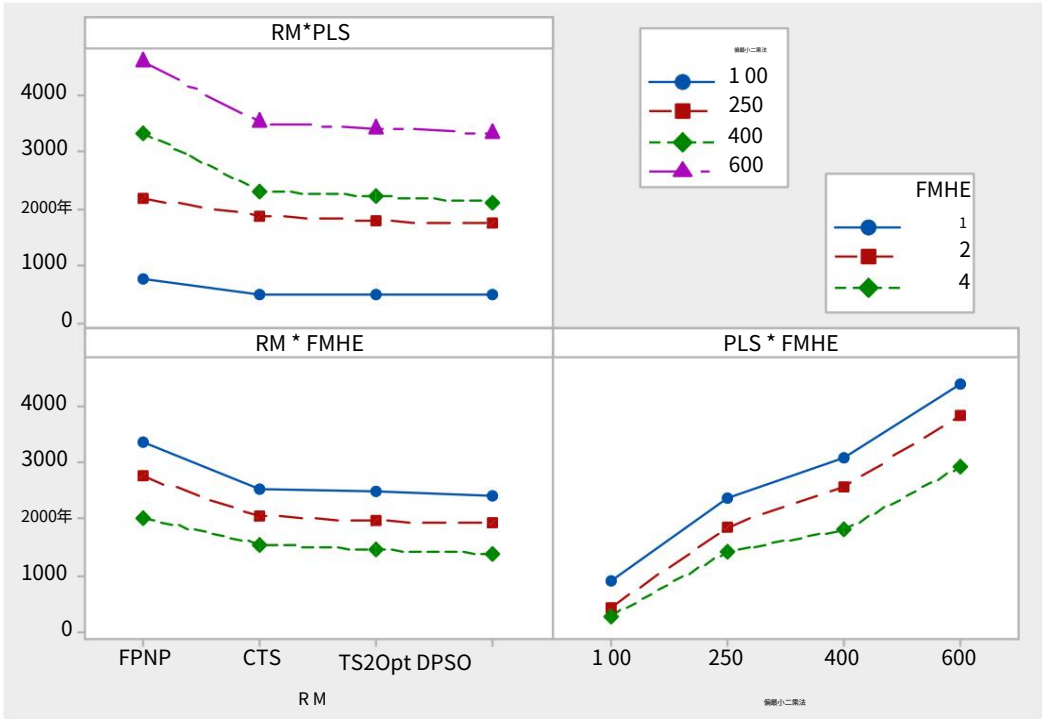


图 4 PRP 的双向交互作用。

图4中的结果表明,离散 PSO (方法路由) 为仓库问题提供了最佳解决方案。PRP 提供了最佳解决方案。总  
入库量之和 TS 2-Opt 元启发法进行比较。三向相互作用效应产生的总上架时间之间的差异可以通过 MHE 的车队规模水平来解释  
三向相互作用效应产生的时间可以通过 MHE 的船队规模水平和清单规模上架因素来解释。发生这种情况是因为较大的清单大小会产生  
集较长的总存放时间。发生这种情况的原因是,由于将产品存放在指定存储位置所需的距离,较大的清单大小会产生较长的总存放时间。  
由于将产品存放在指定存储位置所需的距离而产生的时间。  
另一方面,表5显示了离散 PSO 相比所提供的减少时间,以及 FMHE 对 RM 双向交互作用  
的 FPNP 经验规则和 FPNP 经验规则相比, RM 双向交互效应的表5表明,相对于 FPNP,离散 PSO 可以最大程度地减少  
上架时间。表 5 显示,离散 PSO 相对上架时间的减少幅度最大,根据 FMHE 的水平,其范围在 41.8% 到 43.9% 之间变化。而且,  
时间 P, 根据 FMHE 水平在 41.8% 到 43.9% 之间变化。此外,离散 PSO 和 TS 2-Opt 之间的时间很小,变化范围为 3.2% 到 3.5%。  
离散 PSO 和 TS 2-Opt 之间的差异很小,从 3.2% 到 3.5% 不等。

表 5. FMHE 离散 PSO 节省的时间 (秒)和节省百分比 (%)。

| MHE 数量 | CTS    | TS 2-选项 | FPNP        |
|--------|--------|---------|-------------|
| 一名 H.E | 127.29 | 7.6%    | 58.18 3.5%  |
| 两个 MHE | 137.21 | 7.1%    | 62.48 3.2%  |
|        |        |         | 第736章 43.9% |
|        |        |         | 第831章 42.9% |

表 5. FMHE 离散 PSO 节省的时间 (秒)和节省百分比 (%)。

| 数量<br>荣誉勋章 | CTS    |      | TS 2-选项 |      | FPNP   |       |
|------------|--------|------|---------|------|--------|-------|
| 一名 H.E     | 127.29 | 7.6% | 58.18   | 3.5% | 第736座  | 43.9% |
| 两个 MHE     | 137.21 | 7.1% | 62.48   | 3.2% | 831    | 42.9% |
| 四个H.E      | 160.12 | 7.4% | 73.05   | 3.4% | 902.35 | 41.8% |

同时,表6描述了离散 PSO 相对于 CTS、TS 2-Opt 提供的时间减少以及 PLS 双向交互作用 RM 的 FPNP 经验规则。表6显示离散与 FPNP 相比,PSO 可以更大程度地减少上架时间,其变化范围为 25.2% 到根据 PLS 水平,为 65.6%。此外,PSO 的性能优于禁忌方法,尽管时间离散 PSO 和 TS 2-Opt (最佳禁忌)之间的降低幅度较小,从 2.4% 到 4.7% 不等。

表 6. PLS 节省的时间 (秒)和节省的百分比 (%)。

| 收起来<br>列表大小 | CTS |      | TS 2-选项 |      | FPNP  |       |
|-------------|-----|------|---------|------|-------|-------|
| 100         | 37  | 8.2% | 14      | 3.1% | 295   | 65.6% |
| 250         | 146 | 8.5% | 42      | 2.4% | 第435座 | 25.2% |
| 400         | 187 | 8.9% | 99      | 4.7% | 1221  | 58%   |
| 600         | 191 | 5.8% | 101     | 3%   | 1276  | 38.6% |

离散 PSO 元启发法 (路由方法)及其形成的双向效应相互作用 MHE 数量和上架清单大小对总平均数具有较大的统计显着性如上所述,由于 MS 值较高,因此求解 PRP 的搁置时间。离散型相对于 CTS 和 TS 2-Opt 元启发法,PSO 元启发法减少了总上架时间 2.4%至8.9%。最后,这些结果证明了 PSO 方法对于求解 PRP 的相关性。

七.结论

本文讨论了配送中心上架操作的相关性;其目的是改善规划,产品在存储地点上架的执行和效率。这篇论文揭示了路线活动对上架时间有重大影响,进而影响运营这个过程的效率。这些发现得到了实验研究结果的支持针对本文中所代表的中型 DC 执行。

开发了 PSO 算法并与其他禁忌方法 (TS 2-Opt 和 CTS)进行比较,以及 PRP 的 FPNP 规则。应该指出的是,所提出的问题和元启发法构成了新颖的方法,因为它们代表了解决这个问题的第一个方法。文献中的存放路径问题。离散 PSO 方法生成了最佳解决方案求解相对于 TS 2-Opt 和 CTS 的 PRP,以及 FPNP 规则。此外,还检测到相对于 FPNP,离散 PSO 最大程度地减少了上架时间,这根据 FMHE 的数据,这一比例在 41.8% 至 43.9% 之间。离散 PSO 和 之间的时间差 TS 2-Opt 较小,因为它在 3.2% 和 3.5% 之间变化。另一方面,人们发现与 FPNP 相比,离散 PSO 提供了最大的上架时间缩短 (25.2% 和 65.6%) ,根据 PLS 的水平。此外,离散 PSO 和 TS 2-Opt 较小,因为它的变化范围为 2.4% 和 8.9%。

这些结果表明离散 PSO 元启发式路由方法生成最佳 PRP 的解决方案,优于其他方法,并作为一种非常有前途的解决方案而发展此类问题的方法。因此,这项研究可以减少 PRP 的旅行时间,这意味着运营成本的降低,以及 MHE 在工作中的能源消耗的减少轮班和减少工作时间,支持实现可持续仓储。



作为进一步的研究,我们建议考虑异构 MHE 来解决入库操作中的真实环境。同样,未来的研究应该解决 PRP 解决方案算法与库存管理系统和 WMS 的集成,以及这些传统系统与网络物理系统的集成,以促进操作员和优化方法之间的交互。最后,关于这个问题可以考虑新颖的表述和元启发式方法。

作者贡献: RAG-M。PC和PC在数学模型的制定、实验过程以及对结果的分析和解释方面做出了贡献。JAC和FS参与了文件的编辑和撰写;他们根据上架路线问题的重要性进行了文献综述;此外,他们还分析了应用于解决这些问题的模型的最新技术。所有作者均已阅读并同意稿件的出版版本。

资助:这项研究没有获得外部资助。

利益冲突:作者声明不存在利益冲突。

## 参考

- 1.巴托尔迪,JJ; Hackman,ST 仓储与配送科学;供应链和物流研究所:美国佐治亚州亚特兰大,2014 年。
2. CSCMP 供应链管理:术语和术语。在线提供:<https://bit.ly/2e3NMGE> (访问于 2016 年 11 月 8 日)。
- 3.卡诺,JA;科雷亚-埃斯皮纳尔,A.; Gómez-Montoya,RA 使用遗传算法解决仓库中的订单批处理问题。信息。技术。 2018, 29, 235–244。[交叉参考]
4. Cano, JA 基于拣选员路由启发式的订单拣选优化:最小化仓库中的总行驶距离。载于《国际运输和物流在世界贸易中的应用研究手册》; Ceyhun, G.Ç. 编辑; IGI Global:美国宾夕法尼亚州帕斯迪,2020 年;第 74–96 页。
- 5.范吉尔斯,T.;拉马克克斯,K.;卡里斯,A.; de Koster,RBM 通过结合规划问题设计高效的订单拣选系统:最先进的分类和审查。欧元。 J. 歌剧。资源。 2018,267,1-15。[交叉参考]
6. Cano, JA 低级拾取器到零件系统中联合订单拾取问题的公式。公牛。电。工程师。通知。 2020, 9, 836–844。[交叉参考]
- 7.严慧;唐,S.-L.配送前和配送后越库操作。运输。资源。 E部分物流师。运输。修订版2009, 45, 843–859。[交叉参考]
- 8.德·科斯特,R.;勒杜克,T.; Roodbergen,KJ 仓库订单拣选的设计和控制:文献审查。欧元。 J. 歌剧。资源。 2007, 182, 481–501。[交叉参考]
9. 布伊斯,P.;丹霍夫,HW; Wortmann,JHC 及时零售配送:交叉配送的系统视角。 J.巴士。物流师。 2016, 37, 213–230。[交叉参考]
10. Frazelle,《EH 世界级仓储和物料搬运》,第 2 版;麦格劳-希尔教育:纽约,美国纽约,2016 年;国际标准书号 9780071842822。
- 11.戈麦斯,RA;科雷亚,A.;穆努里,J.; Cortes, P.经典 HVRP (异构车辆路径问题)拣选中的订单批处理和路径问题的比较分析。导演器官。 2016, 59, 49–60。
- 12.陈,FTS; Chan, HK 通过实施分级存储提高人工拣选和多层货架配送仓库的订单拣选生产力。专家系统。应用。 2011, 38, 2686–2700。[交叉参考]
- 13.穆帕尼,VR; Adil,GK 有效形成仓库存储位置分配的存储类别:模拟退火方法。欧米茄2008, 36, 609–618。[交叉参考]
14. Kim,BS; Smith, JS 对基于区域的纸箱拣选分配系统使用相关改进的槽位方法。计算。工业工程2012, 62, 286–295。[交叉参考]
- 15.高滨,H.;西,T.;小西,M.; Imai, J. 仓库管理产品分配计划的确定方法。第 41 届 SICE 年会记录,SICE 2002,日本大阪, 2002 年 8 月 5-7 日;第 1004–1007 页。

- 16.赫拉古,党卫军;杜,L.曼特尔,RJ; Schuur,PC 仓库设计和产品的数学模型分配。国际。J.产品。资源。2005, 43, 327–350。[交叉参考]
- 17.侯俊林;吴YJ;杨YJ 用于存储管理的存储安排和重新分配模型运营。国际。J. 计算机。积分。制造商。2010, 23, 369–390。[交叉参考]
18. Kutzelnigg, R. 仓库中货物的优化分配:在现实约束下最小化订单拣选成本。LINDI 2011 第三届 IEEE 国际物流和工业信息研讨会议论文集,匈牙利布达佩斯,2011 年 8 月 25-27 日;第 65–70 页。
- 19.戈麦斯,RA;吉拉尔多,OG; Campo, EA 批次确认住宿运营最短时间使用元启发法考虑 k 个同质团队。技术信息。2016, 27, 53–62。[交叉参考]
- 20.科雷亚,A.;罗德里格斯,E.; Gómez, R.卫生中心最短住宿时间路线建模。使用禁忌搜索进行分发 (CEDI)。索卢克牧师。研究生环境影响评估2014 年, 6,15-28。
21. Bai, Q. 粒子群优化算法分析。计算。信息。科学。2010, 3, 180–184。[交叉参考]
- 22.戈克萨尔,F.;卡拉奥格兰,I.; Altipark, F. 用于车辆路径的混合离散粒子群优化同时取货和送货的问题。计算。工业工程2013, 65, 39–53。[交叉参考]
- 23.陈F.;王,H.谢,Y. Qi, C. 一种基于 ACO 的多订单拣选器在线路由方法,考虑仓库拥塞情况。J·英特尔。制造商。2016, 27, 389–408。[交叉参考]
24. Masae,M.;格洛克,瑞士; Grosse,EH 仓库中的订单拣选路线:系统文献综述。国际。J.产品。经济。2020, 224, 107564。[交叉引用]
- 25.陈,阿拉巴马州;杨,GK;吴,ZM 容量型混合离散粒子群优化算法车辆路径问题。浙江大学学报科学。2006年, 7,607-614。[交叉参考]
- 26.龚YJ;张,J.刘,O.;黄荣泽;钟,HSH; Shi,YH 使用时间窗优化车辆路径问题:一种离散粒子群优化方法。IEEE 传输。系统。曼赛博恩。C部分 (应用修订版) 2011, 42, 254–267。[交叉参考]
- 27.吴D.;董,M.李,M. Li, F. 使用多目标的时间窗车辆路径问题共同进化方法。国际。J.西穆尔。模型。2016, 15, 742–753。[交叉参考]
- 28.阿利纳吉安,M.;加赞法里,M.;诺鲁齐,N.; Nouralizadeh,H. 时间相关竞争性车辆路径问题的新颖模型:改进的随机拓扑粒子群优化。网络。吐口水。经济。2017, 17, 1185–1211。[交叉参考]
- 29.朱L.;考虑拥堵和排放因素的车辆路径问题研究。国际。J.产品。资源。2019, 57, 6115–6129。[交叉参考]
- 30.Harbaoui Dridi,I.;本·阿拉亚,E.;博恩,P.; Bouchriha, H. 使用 PSO 算法优化具有时间窗和多车辆的多站点取货和送货问题。国际。J.产品。资源。2020, 58, 4201–4214。[交叉参考]
- 31.特巴尔多,I.;比利亚尔迪,B.; Bottani, E. 可持续供应链与创新:近期文献综述。可持续发展2018, 10, 3946。[交叉引用]
- 32.迪纳尔多,M.;克莱里库齐奥,M.;穆里诺,T.; Sepe, C.物流 4.0 环境中的经济订单量随机动态优化模型。可持续发展2020, 12, 4075。[交叉引用]
- 33.迪纳尔多,M.;福里诺,D.; Murino, T. 人机交互的演变:人类在工业 4.0 范式中的角色。产品。制造商。资源。2020 年8 月 20-34 日。[交叉参考]
- 34.卢W.;麦克法兰,D.;詹尼卡斯,V.;张Q. 仓库动态拣货算法运营。欧元。J. 歌剧。资源。2016, 248, 107–122。[交叉参考]
- 35.施罗滕波尔,AH;鲁克,S.;鲁德伯根,KJ;文斯特拉,M.; Dijkstra,AS 具有产品退货和交互延迟的订单拣选器路由。国际。J.产品。资源。2017, 55, 6394–6406。[交叉参考]
- 36.卡诺,JA;科雷亚-埃斯皮纳尔,AA; Gómez-Montoya,RA 针对手动订单拣选系统中的联合订单批处理、排序和拣选器路由问题的数学编程建模。J.沙特国王大学。工程师。科学。2019, 32, 219–228。[交叉参考]
- 37.德弗里斯,J.;德·科斯特,R.; Stam, D. 探索拣选员个性在通过语音拣选、灯光拣选和射频终端拣选预测拣选性能中的作用。国际。J.产品。资源。2015, 54, 2260–2274。[交叉参考]
- 38.肯尼迪,J.; Eberhart, RC 粒子群算法的离散二进制版本。IEEE 国际计算控制论与仿真会议论文集,美国佛罗里达州奥兰多, 1997 年 10 月 12-15 日;第 4104–4108 页。
- 39.林,我;钦,KS;吉隆坡徐市; Wong,TC 基于遗传的离散粒子群优化老年人日托中心时间表。计算。歌剧。资源。2016, 65, 125–138。[交叉参考]

40. 科尔特斯, P.; 戈麦斯-蒙托亚, RA; 穆努祖里, J.; Correa-Espinal, A. 一种禁忌搜索方法, 用于解决大中型配送中心的拣选路线问题, 考虑库存和 K 异构物料搬运设备的可用性。应用。软计算。2017, 53, 61–73。[交叉参考]

41. Henn, S. 订单拣选仓库中在线订单批处理的算法。计算。歌剧。资源。2012年, 39, 2549–2563。[交叉参考]

出版商注: MDPI 对已出版地图和机构隶属关系中的管辖权主张保持中立。



© 2020 作者版权所有。被许可方 MDPI, 瑞士巴塞尔。本文是根据知识共享署名的条款和条件分发的开放获取文章

(CC BY)许可证 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)。