

# 基于“货到人”拣选模式的自动化电缆堆场动态货位分配优化

李涛, 杜国政\*, 张正利, 曹刚

(国网山东省电力公司物资公司, 济南 250001)

**摘要:** **目的** 优化基于“货到人”拣选模式自动化电缆堆场中货位分配, 提高自动化电缆堆场作业效率。**方法** 针对堆场内电缆容器多层堆存造成调库搬运次数多的问题, 建立以出入库行车总搬运次数最小为目标的动态货位分配数学模型, 设计基于最大堆栈时序间隔的自适应大邻域搜索算法进行求解, 得到货位分配优化方案。**结果** 基于最大堆栈时序间隔的自适应大邻域搜索算法的优化方案可以减少出入库行车搬运次数 8.12%左右。**结论** 与现行货位分配规则相比, 文中提出的货位分配策略能够有效提高系统作业效率。

**关键词:** 自动化电缆堆场; “货到人”拣选; 动态货位分配; 自适应大邻域搜索

**中图分类号:** TP249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)13-0230-08

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.026

## Dynamic Allocation in Automated Cable Yards Based on "Goods-to-Person" Picking Model

LI Tao, DU Guozheng\*, ZHANG Zhengli, CAO Gang

(Material Supplies Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to optimize the allocation of space in automatic cable yards based on the "goods to person" picking mode to improve the operation efficiency of automated cable yards. Considering the repositioning caused by the multiple stacking of cable containers, a mathematical model on the dynamic allocation of space was established to minimize the total handling numbers of the inbound and outbound crane. An adaptive large neighborhood search algorithm based on the maximum stack timing interval was designed to solve the problem and obtain the optimization allocation scheme. The optimized solution obtained according to the adaptive large neighborhood search algorithm based on the maximum stack timing interval could reduce the average handling numbers of the inbound and outbound crane by about 8.12%. Compared with the current allocation method, the proposed allocation strategy can effectively improve the working efficiency of the system.

**KEY WORDS:** automated cable yard; "goods-to-person"; dynamic allocation; adaptive large neighborhood search

电缆堆场是电网物资仓库存放电缆线卷的主要设施。当前, 一种自动化电缆堆场系统在电力行业得到成功应用, 该系统通过创新电缆存放容器结构, 将

传统平面存放改为立体存储, 大幅节省堆场存储空间, 提高了物资供应全链条运营水平<sup>[1]</sup>。与传统集装箱堆场立体堆存不同, 自动化电缆堆场中的电缆线卷

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 国网山东省电力公司 2023 年科技项目 (520603230002)

\*通信作者

按照项目需求存放在专用柱式托盘中。拣选时根据项目计划,通过自动化行车将承载待拣货物的柱式托盘从存储区送至拣选站,在拣选站由专用自动化拣选行车从柱式托盘中抓取指定数量的电缆线卷,拣选完成后再通过自动化行车将柱式托盘送回存储区存储,属于“货到人”拣选系统。

“货到人”拣选系统通常借助自动化立体仓库或旋转货架或多层穿梭车存取立库或移动机器人将待拣货物送至作业人员面前,减少拣选人员的非生产性行走时间,提高订单履行效率。针对自动化立体仓库“货到人”拣选系统,Wang 等<sup>[2]</sup>设计适用于电子商务配送中心的“货到人”拣选系统,在此基础上展开货品与拣选站通道的匹配研究;Narumon 等<sup>[3]</sup>对不同的订单批处理策略、存储分配策略和检索排序策略的效果进行测试,确定策略选择;Wauters 等<sup>[4]</sup>针对双堆垛机“货到人”拣选系统的堆垛机调度问题展开研究,以减少等待时间。针对旋转货架“货到人”拣选系统,张志强<sup>[5]</sup>以拣选完所有药品所需时间最小为目标建立单旋转货架拣选路径优化问题数学模型;段军雨等<sup>[6]</sup>则针对多旋转货架仓储系统,建立多目标优化的储位分配模型解决储位分配问题。针对多层穿梭车存取立库“货到人”拣选系统,胡金昌<sup>[7]</sup>、王姗姗等<sup>[8]</sup>分别以料箱出入库次数最小及订单完成时间最短为目标,对订单分批优化问题展开研究;Tone<sup>[9]</sup>在考虑随机存储分配规则与阻塞周转箱就近搬运的条件下,建立双深位穿梭车存储系统的行走时间模型,用于评估双深位穿梭车存储系统的性能。针对移动机器人“货到人”拣选系统,Xiang 等<sup>[10]</sup>研究了仓储系统中货物存储分配问题和订单批处理问题,以最小化货架的访问次数为目标建立混合整数线性规划模型;Boysen 等<sup>[11]</sup>针对小规模订单及拣选货架的顺序进行优化,设计集束搜索启发式算法,以减少所需移动机器人数量;Yuan 等<sup>[12]</sup>以最大化同一移动货架内货品总相关性的建立第 1 阶段货品分配数学模型,采用启发式算法求解,同时以最小化移动机器人总行进距离为目标建立第 2 阶段移动货架分配数学模型,结合贪心算法和改进模拟退火的两阶段混合算法求解。

以上“货到人”拣选系统效率优化研究主要集中在客户订单分批排序优化及货品存储策略优化等方面,较少涉及动态货位分配优化问题。Felix 等<sup>[13]</sup>研究了基于移动机器人的“货到人”拣选系统订单处理过程中,当货架在拣货站和存储区之间不断移动时,在哪里停放货架的问题,以移动机器人执行所有运输请求的总行程距离最小为目标,通过设计自适应规划算法对问题进行求解。该研究假设单深位存储模式,即每个货架都可以直接进入存储区域,未考虑多深位存储模式中机器人必须将其他货架移到一边,才能访问一些阻塞货架的调库作业对系统效率的影响。

基于“货到人”拣选模式的自动化电缆堆场采用

多层柱式托盘压栈存储方式,当出库货物所在柱式托盘不在堆场最上层存放时,需要将其上方所有柱式托盘调库后,才能对其进行出库作业,频繁调库严重影响系统整体作业效率。因此,本文对基于“货到人”拣选模式的自动化电缆堆场动态货位分配优化问题进行研究,建立以出入库行车总搬运次数最小为目标的动态规划模型,设计一种基于最大堆栈时时间间隔的自适应大邻域搜索算法(Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm Based on Maximum Stack Time Interval, MSTI-ALNS)并进行求解。最后,以某电力公司自动化电缆堆场为对象进行实例分析,验证算法的有效性和实用性。

## 1 问题描述

### 1.1 基于“货到人”拣选模式的自动化电缆堆场系统

如图 1 所示,基于“货到人”拣选模式的自动化电缆堆场系统由电缆堆存区域、停车位、暂存区、出入库行车及拣选行车等设施设备构成。其中,停车位、暂存区及拣选行车构成“货到人”拣选站。出入库行车将存放待拣电缆的柱式托盘从电缆堆存区域搬运至暂存区,拣选行车从暂存区内柱式托盘上搬运电缆至停车位上的车辆,属于出库环节;拣选完成后再通过出入库行车将柱式托盘送回电缆堆场区域存储,属于回库环节;在出库过程中,若所需电缆线卷所在的柱式托盘上层有压叠的柱式托盘,需先将上层柱式托盘搬运至其他货位,属于调库环节,自动化电缆堆场作业流程如图 2 所示。

### 1.2 出入库行车作业过程分析

基于“货到人”拣选模式的自动化电缆堆场系统假设如下:

- 1) 电缆堆存区域内一个货位仅能放置一个柱式托盘,一个柱式托盘内仅能存放相同项目的电缆线卷,相同项目的电缆线卷可放置于不同柱式托盘内。
- 2) 将一个待拣柱式托盘设定为一次任务,任务执行顺序、单次任务所需电缆线卷项目及待拣柱式托盘的货位等信息已知。
- 3) 出入库行车单次任务的出库作业时间、入库作业时间和调库作业时间相等。
- 4) 不存在紧急插入任务的情况。
- 5) 仓库辐射区域内工程项目定制电缆提前送至该堆场暂存,等工程项目所需电缆到齐后,根据工程进度需求送至现场,因而假设不存在缺货情况。
- 6) 全部柱式托盘(包括空的柱式托盘)均需要返回电缆堆存区域堆存。
- 7) 出入库行车与拣选行车之间的作业不存在冲突。

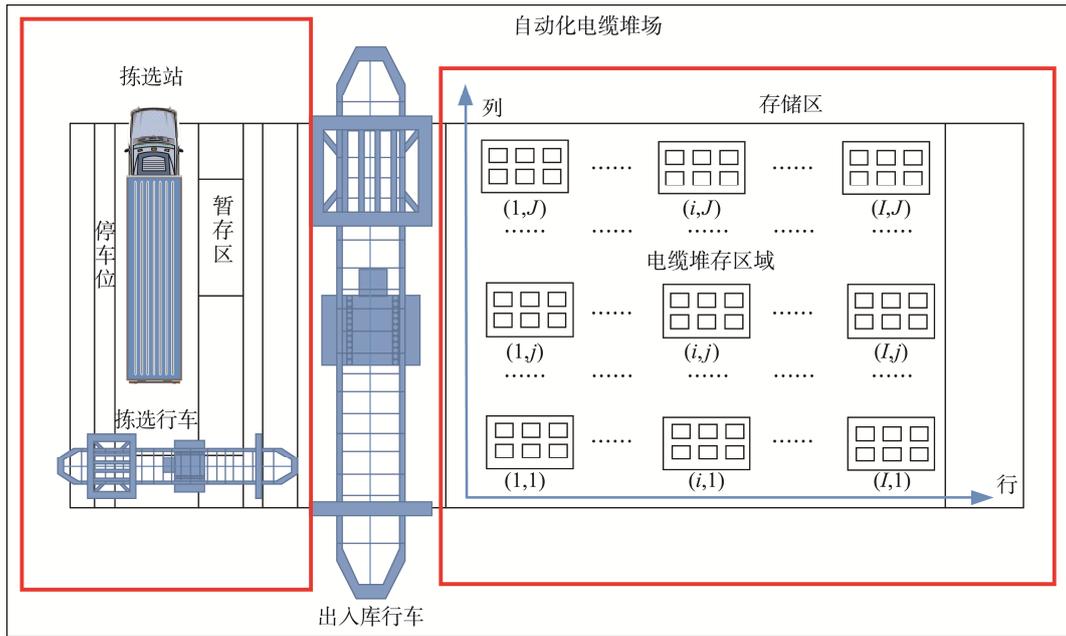


图1 自动化电缆堆场布局  
Fig.1 Layout of automated cable yard

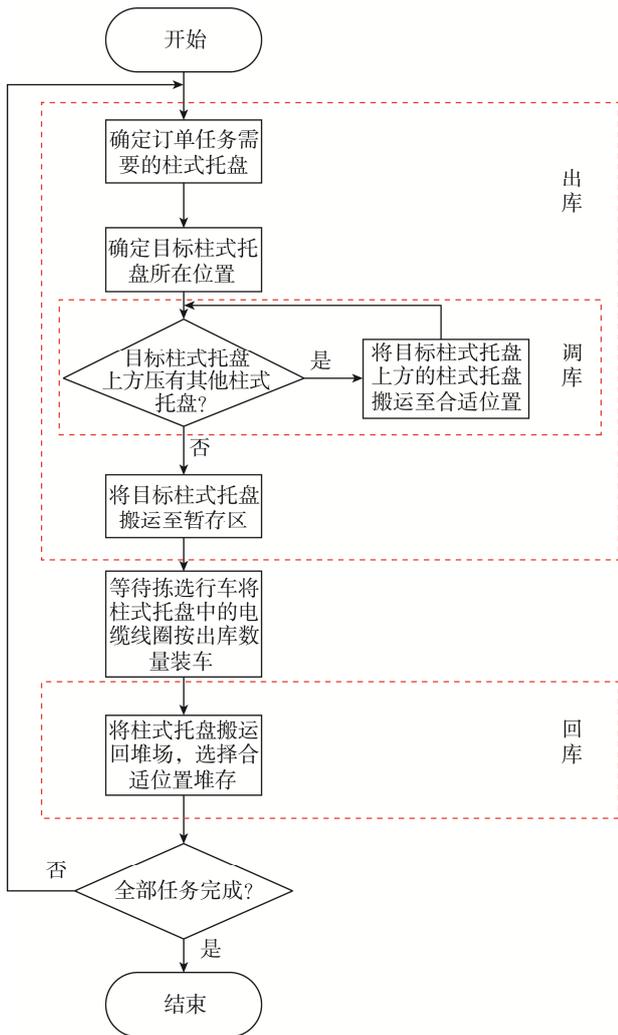


图2 自动化电缆堆场作业流程  
Fig.2 Operation flow chart of automated cable yard

基于上述假设条件，自动化电缆堆场系统的作业效率取决于出入库行车柱式托盘的总搬运次数。在任务信息已知的情况下，出库和回库搬运次数为确定值，因此通过优化回库和调库的动态货位分配来减少倒库搬运次数是提升系统作业效率的关键。

## 2 动态货位分配数学模型

### 2.1 符号和变量

1) 参数符号。电缆堆存区域内货位共有  $I$  行、 $J$  列、 $K$  层，货位  $(i, j, k)$  表示电缆堆存区域第  $i$  行、第  $j$  列、第  $k$  层货位； $t$  表示第  $t$  个拣选任务，对应的目标柱式托盘在电缆堆存区域的坐标为  $(a_t, b_t, c_t)$ ，共计  $T$  个拣选任务。

2) 决策变量。

$$Y_{ijk}^{td} = \begin{cases} 1, & \text{第 } t \text{ 个拣选任务中第 } d \text{ 个决策时间} \\ & \text{分配至货位 } (i, j, k) \\ 0, & \text{第 } t \text{ 个拣选任务中第 } d \text{ 个决策时间} \\ & \text{未分配至货位 } (i, j, k) \end{cases}$$

3) 状态变量。

① 第  $t$  个拣选任务中第  $d$  个决策时间抓取前货位状态：

$$X_{ijk}^{td} = \begin{cases} 1, & \text{第 } t \text{ 个拣选任务中第 } d \text{ 个决策时间} \\ & \text{抓取前货位 } (i, j, k) \text{ 有货} \\ 0, & \text{第 } t \text{ 个拣选任务中第 } d \text{ 个决策时间} \\ & \text{抓取前货位 } (i, j, k) \text{ 无货} \end{cases}$$

② 第  $t$  个拣选任务中第  $d$  个决策时间抓取后货位状态：

$$S_{ijk}^{td} = \begin{cases} 1, \text{第} t \text{个拣选任务中第} d \text{个决策时间} \\ \quad \text{抓取后货位}(i, j, k) \text{有货} \\ 0, \text{第} t \text{个拣选任务中第} d \text{个决策时间} \\ \quad \text{抓取后货位}(i, j, k) \text{无货} \end{cases}$$

### 2.2 动态规划模型

为提高自动化电缆堆场区域“货到人”作业模式下作业效率, 建立以自动化电缆堆场区域内出入库行车的总搬运次数最小为目标的动态规划模型。

目标函数:

$$H_{\text{total}} = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^{K+1-c_t} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk}^{td} \quad (1)$$

约束条件:

$$X_{ijk}^{td} - S_{ijk}^{td} \geq 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (X_{ijk}^{td} - S_{ijk}^{td}) \leq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (X_{ijk}^{td} - S_{ijk}^{td}) \geq Y_{i'j'k'}^{td} \quad (4)$$

$$(1 \leq i' \leq I, 1 \leq j' \leq J, 1 \leq k' \leq K) \quad (5)$$

$$1 - Y_{ijk}^{td} \geq S_{ijk}^{td} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk}^{td} \leq 1 \quad (7)$$

$$S_{ijk}^{td} + Y_{ijk}^{td} = X_{ijk}^{t(d+1)} \quad (8)$$

式 (1) 是动态货位分配问题的目标函数, 即最小化出入库行车的总搬运次数; 式 (2) 为在第  $t$  个拣选任务的第  $d$  个决策时间点抓取前后货位状态合理变化的约束条件; 式 (3) 约束每次决策时至多只能从一个货位上抓取; 式 (4) 为约束决策变量是否可以执行决策的条件; 式 (5) 为是否可以放置的约束; 式 (6) 约束每次决策时至多只能放置到一个货位上; 式 (7) 为相邻 2 次决策间状态转移约束; 式 (8) 为不能悬空放置约束。

## 3 算法求解

自适应大邻域搜索算法由 Ropke 等<sup>[14]</sup>在解决基

于时间窗的提货交付问题时首次提出的一种启发式算法, 其基本思想为: 通过对邻域搜索算子的历史表现, 自适应地选择好的算子对当前解进行破坏和修复, 利用算子间的互相竞争来产生解的邻域结构, 从而更大概率地获得更好的解<sup>[15]</sup>。

针对电网物资仓库自动化电缆堆场“货到人”拣选动态货位分配优化问题, 根据 ALNS 算法思想, 利用最大堆栈时序间隔构建初始解、设计适合的破坏算子及修复算子, 选择合适的算子选择策略、自适应权重调整机制、解的接受准则及算法终止条件等, 实现对问题求解。

### 3.1 编码方式

设完成全部作业任务出入库行车总共搬运  $n$  次, 每次搬运均包含 1 次抓取柱式托盘操作与 1 次放置柱式托盘操作。根据抓取与放置操作顺序进行编码, 编码状态与解码状态的对应关系如图 3 所示。其中, 抓取位置对应的奇数编码为禁用码, 不允许进行破坏及修复操作, 放置位置对应的偶数编码为操作码, 是进行破坏及修复操作的主要区域。

### 3.2 初始解生成

假设第  $t$  个拣选任务第  $d$  次决策时间抓取后货位  $(i, j, k)$  的作业时序定义如下:

$$L_{ijk}^{td} = \begin{cases} +\infty, \text{货位}(i, j, k) \text{内不含后续拣选任务} \\ t', \text{为货位}(i, j, k) \text{内第} t' \text{个拣选任务}(t' > t) \end{cases}$$

则第  $t$  个拣选任务第  $d$  次决策时间最大堆栈时序间隔对应的货位集合为:

$$V_{ijk} \in \left\{ (i, j, k) \mid \max_{1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J} |t - \min_{1 \leq k \leq K} L_{ijk}^{td}| \right\} \quad (9)$$

每次回库货位或调库货位都在货位集合  $V_{ijk}$  中选择, 尽可能避免将待放置的柱式托盘堆存在未来待出库柱式托盘的上层, 以减少新的压叠产生, 降低对后续任务的影响。初始解生成伪代码如算法 1 所示。

算法 1: 初始解生成。

1. 输入:  $M, S$
2. while ( $M \neq \emptyset$ )
3.     抽取一条拣选任务  $m$

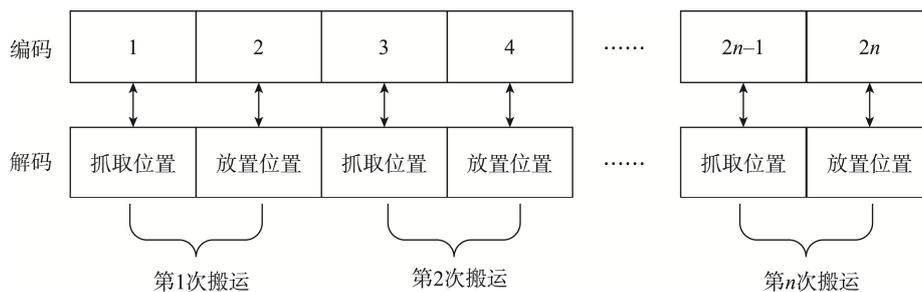


图 3 编码及解码规则  
Fig.3 Encoding and decoding rules

4. while ( $m$  中存在调库作业)  
 5. 确定当前最大堆栈时序间隔对应的货位集合  $V_{ijk}$   
 6. 从  $V_{ijk}$  中选取放置货位, 执行调库作业, 更新  $S$   
 7. End while  
 8. 执行出库作业、回库作业, 更新  $S$   
 9. 从  $M$  中删除  $m$   
 10. End while  
 11. 输出:  $S$   
 其中,  $M$  为拣选任务集合;  $S$  为行车作业序列, 初始为空。

### 3.3 算子设计

#### 3.3.1 破坏算子。

##### 1) 随机破坏算子。

随机在可行操作码中选取 1 个放置位置进行破坏, 将被破坏的操作码放入虚拟中间库进行保存, 以记录破坏点位置, 方便后续查找待修复位置。随机破坏算子对解的质量的提高效果有限, 但有助于提高解的多样性, 跳出局部最优。随机破坏算子伪代码如算法 2 所示。

算法 2: 随机破坏算子。

1. 输入:  $S$   
 2. 提取  $S$  中放置位置为非暂存区的操作码, 添加到集合  $C$  中  
 3. 从  $S$  中随机选择一个操作码  $n$ , 删除  $S$  中操作码  $n$  对应位置的元素  $S_n$   
 4. 记录破坏后作业序列  $S'$   
 5. 输出:  $S'$ ,  $S_n$ ,  $n$   
 其中,  $S$  为行车作业序列。

##### 2) 贪心破坏算子。

针对每组“抓取-放置”操作, 在当前解序列中寻找产生额外搬运次数最多的“抓取-放置”组, 确定该组“抓取-放置”操作中抓取货位位置, 并在该组之前的全部放置操作中检索放置到该抓取货位上层的放置操作进行破坏, 如果未检索到, 则在当前解序列中继续寻找产生额外搬运次数多的“抓取-放置”组, 以同样的操作进行检索、破坏, 依此类推, 直至找到合适的 1 个破坏点。贪心破坏算子伪代码如算法 3 所示。

算法 3: 贪心破坏算子。

1. 输入:  $S$   
 2. 提取  $S$  中放置位置为暂存区的操作码, 添加到集合  $C$  中  
 3. 复制  $S$  记为  $S^*$ , 将  $S^*$  中禁用码、 $C$  中操作码及其对应元素删除  
 4. while ( $C \neq \text{空集}$ )  
 5. 从  $C$  中抽取一个操作码  $n$ 、确定  $S$  中操作码  $n-1$  对应位置的元素  $S_{n-1}$   
 6. 计算本次拣选任务的总调库次数  $d$ , 将

$S_{n-1}$ 、 $n-1$ 、 $d$  存入表格  $T$  中

7. 从  $C$  中删除  $n$   
 8. End while  
 9. while (TRUE)  
 10. 对  $T$  按  $d$  的大小降序排序, 抽取  $T$  中第 1 行数据  
 11. 寻找  $S^*$  中操作码小于  $n-1$  的且与  $S_{n-1}$  同排同位的元素  $S_x^*$   
 12. If ( $S_x^*$  存在) then  
 13. 获得  $S_x^*$  的操作码记为  $x$ , 删除  $S$  中操作码  $x$  对应位置的元素  $S_x$   
 14. 记录破坏后解  $S'$   
 15. Break  
 16. else  
 17. 删除  $T$  中第 1 行数据  
 18. Continue  
 19. End if  
 20. End while  
 21. 输出:  $S'$ ,  $S_x$ ,  $x$   
 其中,  $S$  为行车作业序列。

#### 3.3.2 修复算子

##### 1) 随机修复算子。

在全部可行货位中随机选择一个货位, 根据虚拟中间库中存储的破坏点位置, 将货位插入至破坏点处, 完成一次随机修复。完成破坏点的修复后, 从破坏位置开始, 后续全部任务采用初始解生成策略重新进行补充, 并与破坏点前的部分进行组合, 形成完整解。随机修复算子伪代码如算法 4 所示。

算法 4: 随机修复算子。

1. 输入:  $S'$ ,  $n$ ,  $U$   
 2. 根据  $U$  寻找堆场内的可放置货位, 添加到集合  $C$  中  
 3. 从  $C$  中随机选择一个货位  $X$ , 添加到  $S'$  的操作码为  $n$  的位置  
 4.  $S'$  中破坏位置  $n$  后续序列按照初始解生成规则重新生成, 并记为新解  $S$   
 5. 输出:  $S$

其中,  $S'$  为破坏后的行车作业序列;  $n$  为破坏位置;  $U$  为当前库存状态。

##### 2) 贪心修复算子。

将全部可行货位依次放入破坏点处进行修复, 并分别采用初始解生成策略对后续任务进行补充, 计算修复后在破坏点之后的序列长度, 以“修复货位-破坏点后序列长度”的形式放入集合内。在该集合中选择破坏点后序列长度最小的元素, 对应的修复货位即为本次修复的最终方案。贪心修复算子伪代码如算法 5 所示。

算法 5: 贪心修复算子。

1. 输入:  $S'$ ,  $n$ ,  $U$   
 2. 根据  $U$  寻找堆场内的可放置货位, 添加到  $C$  中

3.while (  $C \neq \emptyset$  )

4. 从  $C$  中随机选择一个货位  $X$ , 添加到  $S'$  的操作码为  $n$  的位置

5.  $S'$  中破坏位置  $n$  后续序列按照初始解生成规则重新生成, 并记为新解  $S''$

6. 计算  $S''$  的总操作次数  $m$ , 将  $X$ 、 $m$  存入表格  $T$

7.End while

8.从  $T$  中选出  $m$  值最小的货位  $X$  并添加到  $S$  操作码为  $n$  的位置, 并重新生成新解  $S$

9.输出:  $S$

其中,  $S'$  为破坏后的行车作业序列;  $n$  为破坏位置;  $U$  为当前库存状态。

### 3.4 算子选择策略及自适应权重调整机制

为以上算子分配权重, 使用轮盘赌的方式进行选择: 设  $\beta$  个破坏算子集合  $M = \{m | 1, 2, \dots, \beta\}$ ,  $\gamma$  个修复算子集合  $N = \{n | 1, 2, \dots, \gamma\}$ ,  $g(m)$  与  $g(n)$  分别表示破坏算子与修复算子的权重, 则概率计算式见式 (10)。

$$p(m) = \frac{g(m)}{\sum_{m=1}^{\beta} g(m)}, \quad p(n) = \frac{g(n)}{\sum_{n=1}^{\gamma} g(n)} \quad (10)$$

算法在迭代时起初为各个算子赋值相同的初始权重, 在每次迭代过程中, 根据算子的不同表现阶梯式赋分, 所得分数越高则算子表现越好, 从而使得算子权重与以往表现相关联。算子权重调整公式见式 (11) [16]。

$$\omega = \begin{cases} \omega & \theta = 0 \\ (1 - \rho)\omega + \rho \frac{\varphi}{\theta} & \theta > 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\omega$  为算子权重;  $\varphi$  为算子分数;  $\theta$  为算子使用次数;  $\rho$  为用于控制权重变化速度的权重更新系数。

### 3.5 接受准则和停止条件

采用模拟退火的思想生成解的接受准则, 使得在算子迭代过程中, 如果所得新解优于当前解, 则接受新解; 如果所得新解劣于当前解, 则以一定的概率接

受新解, 从而保证算法有一定的概率跳出局部最优 [17]。接受概率公式见式 (12)。

$$p = \begin{cases} 1 & f(u+1) < f(u) \\ e^{-\frac{-(f(u+1)-f(u))}{T}} & f(u+1) \geq f(u) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $f(u+1)$  为新解的目标函数值;  $f(u)$  为当前解的目标函数值;  $T$  为模拟退火算法当前温度值。本算法中采用“达到迭代次数上限”作为算法的终止条件。

## 4 实例验证

图 4 为某地市电力物资仓库自动化电缆堆场现场。电缆堆存区域内有 5 行、5 列、3 层共计 75 个货位。单个柱式托盘内最大容纳 6 个电缆线卷, 1 台出入库行车与 1 台拣选行车配合作业, 拣选站设置 1 个卡车停车位及 1 个柱式托盘暂存区。现行货位分配规则为调库货位选择就近货位, 回库货位选择出库前原始位置。应用 MSTI-ALNS 算法构建动态货位分配方案, 与现行货位分配规则及改进前 ALNS 算法进行对比, 验证优化方案有效性。

为平衡算法运行时间及算法运行效果, 经实验测试, 选择设置算法主框架最大迭代次数为 150 次; 设置模拟退火接受准则初始温度为 100 °C, 温度下降系数为 0.96。改进前 ALNS 算法相关参数保持一致, 全部实例验证均基于以上参数设置下进行。

### 4.1 实例算法效果分析

自动化电缆堆场内存有 58 个柱式托盘, 储存的电缆线卷项目数为 20~25 个。基于 2022 年历史作业记录, 从中抽取 5 组连续作业记录, 每组包含 20 个拣选柱式托盘, 组内按照出库时间进行作业排序。采用 MSTI-ALNS 算法和现行货位分配规则求解货位分配方案, 分析 2 种算法在不同任务组下对应的出入库行车的总搬运次数。实验结果如表 1 所示。



图 4 某地市电力物资仓库自动化电缆堆场  
Fig.4 Automated cable yard site at a local municipal power supply warehouse

表 1 实验结果汇总  
Tab.1 Summary of experimental results

任务组别	出入库行车总搬运数/次			MSTI-ALNS 比现行货位分配规则 总搬运次数的优化率/%	MSTI-ALNS 比 ALNS 总搬运次数 的优化率/%
	现行货位 分配规则	ALNS	MSTI-ALNS		
任务组 1	51	48	47	7.84	2.08
任务组 2	59	57	54	8.47	5.26
任务组 3	52	51	48	7.69	5.88
任务组 4	52	51	48	7.69	5.88
任务组 5	57	54	52	8.77	3.70
平均值	54.2	52.2	49.8	8.12	4.60

由表 1 可知,通过实际算例证明 MSTI-ALNS 算法较现行货位分配规则的出入库行车总搬运次数平均减少 4.4 次,平均优化率为 8.12%;MSTI-ALNS 算法较改进前 ALNS 算法的出入库行车总搬运次数平均减少 2 次,平均优化率为 4.60%。

#### 4.2 算法敏感度分析

为测试出库任务所含项目数和初始库存所含项目数对算法效果的影响,假设自动化电缆堆场内平均每个电缆线卷项目含 2~3 个柱式托盘,随机生成所含项目数分别为 15、20、25 个的电缆堆存区域初始库存及其货位分布。在每种初始库存状态下,随机生成项目数为 5、10、15 和 20 个的出库任

务,每组任务含 20 个待拣柱式托盘。MSTI-ALNS 算法较现行货位分配规则的出入库行车总搬运次数优化率如表 2 所示。

由表 2 可见,在初始库存电缆线卷项目数相同的情况,随着出库任务电缆线卷项目数的增加,MSTI-ALNS 算法比现行货位分配规则出入库行车总搬运次数优化率逐步增大;在出库任务电缆线卷项目数相同的情况,随着初始库存电缆线卷项目数的减少,MSTI-ALNS 算法比现行货位分配规则出入库行车总搬运次数优化率不断增大。因此,出库任务项目数覆盖初始库存项目数越多,应用 MSTI-ALNS 算法实现动态货位分配对提升系统作业效率的效果越明显。

表 2 算法敏感度分析结果  
Tab.2 Algorithm sensitivity analysis results

出库任务所含 项目数	总搬运次数优化率/%		
	初始库存含 15 个电缆线卷项目	初始库存含 20 个电缆线卷项目	初始库存含 25 个电缆线卷项目
5	8.52	6.39	5.90
10	10.24	8.73	8.57
15	11.79	10.40	9.92
20	—	11.11	10.85
平均优化率	10.18	9.16	8.81

## 5 结语

本文以减少“货到人”拣选模式下自动化物资仓库堆场出入库行车总搬运次数为目标,对堆场动态货位分配问题进行了分析、建模求解与实例仿真。实例分析结果表明,本文提出的MSTI-ALNS算法与现行货位分配规则相比可减少出入库行车总搬运次数8.12%左右,较改进前ALNS算法相比可减少出入库行车总搬运次数4.6%左右。

立体存储方式可有效提高空间利用率,因此自动化立体堆场替代平面堆场是发展趋势。本文提出的堆场动态货位分配算法可提高立体堆场的作业效率,具有较高的应用价值与推广前景。此外,该“货到人”拣选系统由出入库行车和拣选行车组成,通过2个行车的协同调度优化提高系统整体作业效率是深入研究的方向。

### 参考文献:

- [1] 任晓文,王璐雯,王贞民. 国网山东电力打造绿色数字化供应链[N]. 国家电网报, 2021-12-20(002).  
REN X W, WANG L W, WANG Z M. State Grid Shandong Power Creates Green Digital Supply Chain[N]. State Grid News, 2021-12-20(002).
- [2] WANG W R, WU Y H, WU Y Y. A Multi-Stage Heuristic Algorithm for Matching Problem in the Modified Miniload Automated Storage and Retrieval System of E-Commerce[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(3): 641-648.
- [3] NARUMON C, ORAN K. Improving of an Automated Storage and Retrieval System in a Construction Material Retailer[J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017, 12(17): 4338-4343.
- [4] WAUTERS T, VILLA F, CHRISTIAENS J, et al. A Decomposition Approach to Dual Shuttle Automated Storage and Retrieval Systems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 101: 325-337.
- [5] 张志强. 单旋转货架最优拣选路径求解[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(4): 68-72.  
ZHANG Z Q. Optimum Route Picking Solution for Multi-Rotating Shelves[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2018, 33(4): 68-72.
- [6] 段军雨,芮万智,贾正荣. 基于AS-NSGA-II算法的多旋转货架储位优化研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 235-241.  
DUAN J Y, RUI W Z, JIA Z R. Research on Storage Location Optimization of Multi-Rotating Racks Based on AS-NSGA-II Algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(9): 235-241.
- [7] 胡金昌. 多层穿梭车分拣系统的订单分配优化[D]. 济南: 山东大学, 2016.  
HU J C. Order Allocation Optimization of Multi-Layer Shuttle Sorting System[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [8] 王姗姗,张纪会. “货到人”拣选系统订单分批优化[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2022, 19(3): 74-80.  
WANG S S, ZHANG J H. Order Batch Optimization For "Part-to-Picker" Order Picking Systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2022, 19(3): 74-80.
- [9] TONE L. Travel Time Model for Double-Deep Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(9): 2519-2540.
- [10] XIANG X, LIU C C, MIAO L X. Storage Assignment and Order Batching Problem in Kiva Mobile Fulfillment System[J]. Engineering Optimization, 2018, 50(11): 1941-1962.
- [11] BOYSEN N, BRISKORN D, EMDE S. Parts-to-Picker Based Order Processing in a Rack-Moving Mobile Robots Environment[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262(2): 550-562.
- [12] YUAN R P, LI J T, WANG W, et al. Storage Assignment Optimization in Robotic Mobile Fulfillment Systems[J]. Data-Enabled Intelligence in Complex Industrial Systems, 2021, 2021: 1-11.
- [13] FELIX W, NILS B, DIRK B. Storage Assignment with Rack-Moving Mobile Robots in KIVA Warehouses[J]. Transportation Science, 2018, 52(6): 1479-1495.
- [14] STEFAN R, DAVID P. An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows[J]. Transportation Science, 2006, 40(4): 455-472.
- [15] 李焱,潘大志,郑思情. 多车场带时间窗车辆路径问题的改良自适应大邻域搜索算法[J/OL]. 计算机应用: 1-11[2024-06-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20230927.1650.014.html>.  
LI Y, PAN D Z, ZHENG S Q. Improved Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm Formulti-Depot Vehicle Routing Problem with Time Window[J/OL]. Journal of Computer Applications: 1-11[2024-06-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20230927.1650.014.html>.
- [16] 吴廷映,陶新月,孟婷. “卡车+无人机”模式下带时间窗的取送货车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(7): 2440-2448.  
WU T Y, TAO X Y, MENG T. Pickup and Delivery Problem with Time Windows in Mode of "Truck+drone"[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(7): 2440-2448.
- [17] ZHENG H K, SUN H J, ZHU S R, et al. Air Cargo Network Planning and Scheduling Problem with Minimumstay Time: A Matrix-Based ALNS Heuristic[J]. Transportation Research Part C, 2023, 156: 1-21.