

# 控制与决策

Control and Decision

## 铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

王小寒, 贾玉林, 蔡佳芯, 靳志宏

引用本文:

王小寒, 贾玉林, 蔡佳芯, 等. 铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化[J]. *控制与决策*, 2021, 36(12): 3063–3073.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### [自适应Jaya算法求解多目标柔性车间绿色调度问题](#)

Multi-objective flexible job shop green scheduling problem with self-adaptive Jaya algorithm

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1714–1722 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1773>

#### [两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型](#)

Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1377–1386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1357>

#### [基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题](#)

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem

*控制与决策*. 2021, 36(5): 1181–1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

#### [基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度](#)

Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm

*控制与决策*. 2021, 36(11): 2751–2759 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523>

#### [基于动态资源权重的多技能项目调度启发式算法](#)

Dynamic resource priority-based heuristics for multi-skill resource constrained project scheduling problem

*控制与决策*. 2021, 36(10): 2553–2561 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0070>

# 铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

王小寒, 贾玉林, 蔡佳芯, 靳志宏<sup>†</sup>

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 铁路集装箱中心站主作业区资源分配与作业调度联合优化对其经营效益和运作效率有重要影响. 基于“轨道吊-集卡”协同装卸方案, 引入轨道吊动态配置原则, 以最大化作业均衡率和最小化作业成本为目标, 构建多目标非线性混合整数规划模型, 综合研究作业区域动态划分、贝位分配以及多轨道吊调度多层次联合优化问题. 根据问题特点, 融合启发式规则、遗传算法和模拟退火算法, 设计 3 层混合启发式算法求解模型. 通过不同规模算例, 对比 Cplex 与所设计算法的实验结果, 验证模型的正确性和算法的有效性, 并借助于不同划分原则、不同优化策略与不同间隔约束下的对比实验, 验证优化模型与算法普适性. 结果表明, 新型装卸方案、动态作业区域以及联合优化策略可大幅度均衡轨道吊作业量, 避免资源过度负载、降低中心站作业成本, 为中心站的实际运营管理提供决策支持.

**关键词:** 铁路集装箱中心站; 作业区域; 贝位分配; 轨道吊调度; 轨道吊-集卡; 动态配置

中图分类号: U291.5

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0597

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 王小寒, 贾玉林, 蔡佳芯, 等. 铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化 [J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 3063-3073.

## Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal

WANG Xiao-han, JIA Yu-lin, CAI Jia-xin, JIN Zhi-hong<sup>†</sup>

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The integrating optimization of resource allocation and operation scheduling in the main operation area of the railway container terminal has a significant impact on operation performance and efficiency. Based on the gantry cranes and trucks cooperative handling plan and introducing the principle of dynamic allocation of gantry cranes, a multi-objective non-linear mixed-integer programming model is constructed, which is to maximize balance rate and minimize handling costs, to comprehensively study the multi-level collaborative optimization problems, including the crane area division, slot assignment, and multi-gantry crane scheduling. Based on the characteristics of the problem, combining the heuristic rules, the genetic algorithm, and the simulated annealing algorithm, a three-layer hybrid heuristic algorithm is designed to solve the model. The Cplex solver and the algorithm designed are applied to solve different scale examples to verify the correctness of the model and the effectiveness of the algorithm. By comparison with the experimental results of different division principles, optimization strategies, and interval constraints, the universality of the model and algorithm are shown. The results show that the new handling scheme, dynamic crane area, and the integrating optimization strategy can greatly balance the rate of gantry crane operation, avoid overburdening resources and reduce the handling cost of the railway container terminal, which provides decision support for the actual operation and management of it.

**Keywords:** railway container terminal; crane area; slot allocation; gantry crane scheduling; gantry cranes and trucks; dynamic allocation

## 0 引言

作为综合交通运输体系的关键节点, 铁路集装箱中心站(简称为“中心站”)内部资源分配与作业调度

的联合优化是提高其经营效益和作业能力、保障服务水平的重要前提. 轨道吊是主作业区主型装卸资源, 为提高中心站作业效率、降低作业成本, 基于“轨

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-09-28.

基金项目: 中国科学技术协会“一带一路”国际科技组织合作平台建设项目(2020ZZGJB072032); 辽宁省自然科学基金联合基金项目(2020HYLH49); 大连市领军人才项目(2018-573); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132019301).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: jinzhihong@dlnu.edu.cn.

道吊-集卡”协同装卸方案<sup>[1]</sup>,合理决策集装箱贝位分配、轨道吊作业区域划分以及多轨道吊调度3个相关问题,可有效避免轨道吊长距离移动和过度损耗。

关于集装箱贝位分配问题,现有研究多集中于码头堆场,张灿荣等<sup>[2]</sup>考虑集装箱重量概率分布堆存状况可变的情形,以最小化翻倒箱次数为目标构建了带约束的随机动态规划模型。Chen等<sup>[3]</sup>采用顺序堆放原则解决海运出口箱的贝位分配问题。崔东方等<sup>[4]</sup>研究集装箱贝位分配问题,探讨了进出口集装箱贝位的最优比例关系。目前,针对主作业区装卸方案,学者多集中于多轨道吊调度问题<sup>[5-10]</sup>,Guo等<sup>[5-6]</sup>综合考虑中心站与集卡公司双方利益,以装卸时间最小为目标建立模型,研究中心站与公铁转运场站的轨道吊调度问题。王力等<sup>[7-8]</sup>基于已知的集装箱装卸位置,构建优化模型,确定轨道吊作业顺序。关于主作业区装卸资源协同作业方面,Fedtke等<sup>[11]</sup>提出在铁-铁转运堆场采用轨道吊与穿梭车联合装卸模式。王小寒等<sup>[1]</sup>提出在中心站主堆场采用“轨道吊-集卡”协同装卸方案。在装卸桥作业区域划分方面,Boysen等<sup>[12-14]</sup>首次进行科学研究,基于已知的集装箱位置,考虑装卸桥重载作业均衡为目标构建模型,并设计动态规划算法求解,但忽略了在整个作业过程中占较大比例的空驶移动距离。为便于研究多装卸桥调度问题,学者通常设计作业区域划分原则来简化装卸桥任务分配,现有文献主要包括3种思想:等分作业区域<sup>[8,11,15-16]</sup>、等分任务量作业区域<sup>[17]</sup>、静态作业区域<sup>[12-14]</sup>。然而,这3种原则均将装卸桥划分问题视为静态、独立的,均未考虑装卸桥调度方案和集装箱位置对作业区域划分结果的反作用。此外,现有文献多是以作业任务数量为标准<sup>[15-16,18-19]</sup>衡量装卸桥作业负荷。轨道吊体型笨重,移动距离缓慢,且移动距离与作业成本和能耗呈正比关系。因此,与以箱为标准相比,考虑经济和绿色指标,采用箱×米为标准衡量作业负荷更具说服力,但相关研究较少。

综上所述,本文针对主作业区,基于“轨道吊-集卡”装卸模式,提出轨道吊动态配置与调度方案,集成优化作业区域动态划分、集装箱贝位分配与多轨道吊调度3个双向关联的问题,构建以作业均衡率最大、中心站作业成本最小的双目标非线性混合整数规划模型,并设计融合启发式规则、遗传算法和模拟退火算法的3层混合启示式算法(three-layer hybrid heuristic algorithm, TLHHA)求解模型。

## 1 问题描述

本文研究的资源分配问题对象是空间资源,即装卸线堆场贝位和作业区域,作业调度研究对象为作业区域内的多轨道吊。轨道吊横跨铁路装卸线、集卡通道和装卸线堆场,是中心站主作业区关键资源,承担到离站集装箱的装卸和堆垛作业。为避免多轨道吊间相互干扰、减少轨道吊长距离跑位、均衡轨道吊作业量,基于“轨道吊-集卡”装卸方案,合理决策轨道吊作业区域。

以卸载作业为例,中心站有两种卸载方案:1)直接卸载,当集装箱所处车厢和贝位均处于轨道吊作业范围内时,轨道吊直接将车厢上的集装箱卸载至箱位;2)间接卸载,当集装箱所处车厢和贝位仅有一处位于轨道吊作业范围内时,则由轨道吊负责将列车上集装箱卸至集卡,集卡经水平运输至贝位侧,然后由另一台轨道吊将集装箱从集卡堆放至箱位。间接卸载方案存在两个子操作,即吊装和吊卸操作,此时,机动性差、操作成本高的轨道吊远距离重载移动由灵活性差、运输成本低的集卡代替,具体操作见图1。

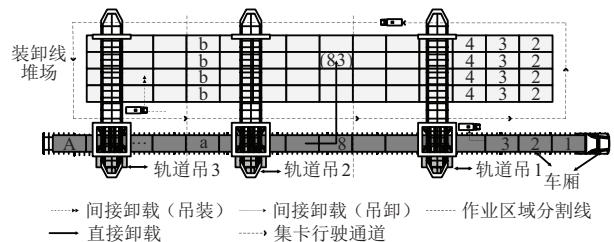


图1 卸载操作流程示意

为清晰描述所研究问题,沿装卸线,将列车车头至车尾方向定义为正方向,对整个作业区域和轨道吊编号。此外,在主作业区内,集卡行驶通道是双向单向道,行驶朝向列车车头方向,为保证作业安全,避免设备碰撞,集卡在车道内不允许掉头。最后,到站集装箱贝位分配是中心站运营管理的主要工作之一,在实际操作中,集装箱的贝位通常与其车厢之间的距离在一定界限内。

本文研究的中心站主作业区资源配置和调度问题是一个多层次、双向关联的联合优化问题。首先,码头堆场箱区长度较短,一般至多配置2台场桥即可,而中心站装卸线较长,一般需配置3至4台轨道吊,合理确定作业区域是避免干扰和保证作业均衡的重要决策。其次,在码头堆场,集卡到达顺序决定了场桥作业顺序,作业区域划分决定了场桥任务分配,一旦贝位分配问题决策完成,场桥作业量便得以确定。可见,码头堆场的3个子问题是单向影响的,联合优化问题

可简化为求解贝位分配问题. 然而, 在中心站, 列车所载集装箱同时到离站, 使得3个子问题双向相互影响, 难以独立决策, 作业区域划分与贝位分配是决策多轨道吊调度的基础, 而多轨道吊调度结果影响贝位分配决策, 且多轨道吊调度与贝位分配对作业区域划分具有反作用. 两个场站联合优化问题决策思路对比如图2所示.

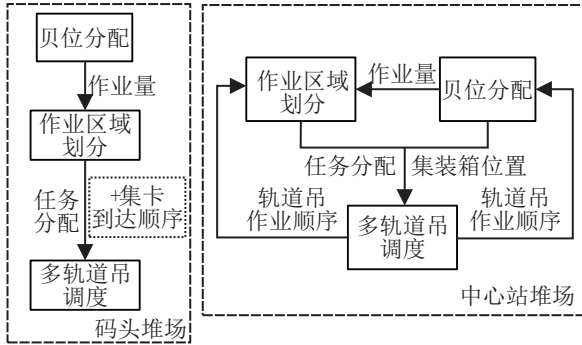


图2 码头与中心站联合优化问题决策思路对比

## 2 数学模型

### 2.1 模型假设

- 1) 集装箱箱型均为40 ft且属于同一列车;
- 2) 集装箱的车厢位置和轨道吊初始位置已知;
- 3) 集卡资源是足够的;
- 4) 每个集装箱视为一个任务;
- 5) 每台轨道吊都有一个虚拟开始任务0和虚拟结束任务0', 且均位于初始位置.

### 2.2 符号说明

- 1) 集合与参数.
  - $I$ : 任务集合,  $i, j \in I$ ;
  - $G$ : 轨道吊集合,  $g \in G$ ;
  - $S$ : 作业区域集合,  $s, s' \in S$ ;
  - $B$ : 贝位编号集合,  $b \in B$ 且 $B \subseteq S$ ;
  - $L_{is}$ : 任务 $i$ 的车厢位置对应于区域 $s$ ;
  - $d, w$ : 单位贝位的长度和宽度;
  - $R$ : 堆场排位总数;
  - $Q_b$ : 贝位 $b$ 最大堆存箱量;
  - $N_b$ : 贝位 $b$ 预留箱位数;
  - $P_b$ : 贝位 $b$ 已堆存集装箱数;
  - $C_1, C_2$ : 轨道吊单位重载、空载距离运输成本;
  - $C_3$ : 集卡单位距离运输成本;
  - $\alpha$ : 轨道吊移动距离平衡化参数;
  - $H$ : 车厢与贝位间的最大间隔值;
  - $M$ : 充分大的正数.
- 2) 决策变量.

$x_{ib}$ : 0-1变量, 若任务 $i$ 安排在贝位 $b$ , 则 $x_{ib} = 1$ , 否则,  $x_{ib} = 0$ ;

$y_{gs}$ : 0-1变量, 若轨道吊 $g$ 作业范围的右界限是作业区域 $s$ , 则 $y_{gs} = 1$ , 否则,  $y_{gs} = 0$ ;

$z_{ij}^g$ : 0-1变量, 若两个连续任务 $i, j$ 由同一台轨道吊 $g$ 操作, 则 $z_{ij}^g = 1$ , 否则,  $z_{ij}^g = 0$ .

### 3) 衍生变量.

$[l_g, r_g]$ : 轨道吊 $g$ 的作业范围,  $l_g$ 为左界限,  $r_g$ 为右界限;

$I_g^1, I_g^2$ : 轨道吊 $g$ 直接卸载、间接卸载任务集合;

$I_g^{ul}, I_g^l$ : 轨道吊 $g$ 间接卸载时的吊卸、吊装任务集合, 其中 $I_g^{ul} (I_g^l) \subseteq I_g^2$ ;

$D_{gi}^1$ : 轨道吊 $g$ 操作任务 $i$ 时重载移动距离;

$D_i^2$ : 集卡操作任务 $i$ 的运输距离;

$E_{ij}^g$ : 轨道吊 $g$ 操作两个连续任务 $i$ 和 $j$ 的空驶距离;

$\phi_g$ : 轨道吊 $g$ 完成所有任务的移动总距离.

### 2.3 数学模型

基于上述假设, 以最大化作业均衡率和最小化作业成本为目标, 构建多目标非线性混合整数规划模型[M1]如下:

$$\min f_1 = \sum_{g \in G} \sum_{i \in I} C_1 D_{gi}^1 + \sum_{g \in G} \sum_{i \in IV\{0\}} \sum_{j \in IV\{0'\}} C_2 E_{ij}^g + \sum_{i \in I} C_3 D_i^2; \quad (1)$$

$$\max f_2 = \frac{\min(\phi_g)}{\max(\phi_g)}. \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ib} = 1, \forall i \in I. \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ib} + P_b + N_b \leq Q_b, \forall b \in B. \quad (4)$$

$$\max(sL_{is} - H, 0) \leq bx_{ib} \leq \min(sL_{is} + H, B), \forall i \in I, s \in S, b \in B. \quad (5)$$

$$s'y_{g-1s'} + 1 \leq sy_{gs} \leq S - G + g, \forall s, s' \in S, g \in G. \quad (6)$$

$$l_g \geq g, \forall g \in G. \quad (7)$$

$$l_g = \begin{cases} 1, & g \in \{1\}; \\ sy_{g-1s} + 1, & \forall s \in S, g \in G \setminus \{1\}. \end{cases} \quad (8)$$

$$r_g = \begin{cases} sy_{gs}, & \forall s \in S, g \in G \setminus \{G\}; \\ S, & \forall g \in \{G\}. \end{cases} \quad (9)$$

$$I_g^1 = \{i \in I | (l_g \leq bx_{ib} \leq r_g) \wedge (l_g \leq sL_{is} \leq r_g),$$

$$\forall s \in S, b \in B, \forall g \in G. \quad (10)$$

$$I_g^2 = \{i \in I | (l_g \leq bx_{ib} \leq r_g) \vee (l_g \leq sL_{is} \leq r_g), \\ \forall s \in S, b \in B\} - I_g^1, \forall g \in G. \quad (11)$$

$$I_g^{ul} = \\ \{i \in I | (bx_{ib} < l_g \vee bx_{ib} > r_g) \wedge (l_g \leq sL_{is} \leq r_g), \\ \forall s \in S, b \in B\}, \forall g \in G. \quad (12)$$

$$I_g^l = \\ \{i \in I | (l_g \leq bx_{ib} \leq r_g) \wedge (sL_{is} < l_g \vee sL_{is} > r_g), \\ \forall s \in S, b \in B\}, \forall g \in G. \quad (13)$$

$$\sum_{i \in (I_g^1 \vee I_g^2) \vee \{0\}} z_{ij}^g = 1, \\ \forall g \in G, j \in (I_g^1 \vee I_g^2) \vee \{0\}, i \neq j. \quad (14)$$

$$\sum_{j \in (I_g^1 \vee I_g^2) \vee \{0\}} z_{ij}^g = 1, \\ \forall g \in G, i \in (I_g^1 \vee I_g^2) \vee \{0\}, i \neq j. \quad (15)$$

$$D_{gi}^1 = x_{ib}L_{is}|s - b|d, \\ \forall i \in I_g^1, \forall g \in G, s \in S, b \in B. \quad (16)$$

$$D_{gi}^2 = \begin{cases} x_{ib}L_{is}|s - b|d, & s > b; \\ x_{ib}L_{is}(|s + 2B - b|d + 2Rw), & s < b; \end{cases} \\ \forall i \in \bigcup_{g \in G} I_g^2, s \in S, b \in B. \quad (17)$$

$$E_{ij}^g = \begin{cases} z_{ij}^g L_{is} L_{js'} |s - s'|d, & i \in I_g^{ul}, j \in (I_g^1 \vee I_g^{ul}); \\ z_{ij}^g L_{is} x_{jb'} |s - b'|d, & i \in I_g^{ul}, j \in I_g^l; \\ z_{ij}^g x_{ib} L_{js'} |b - s'|d, & i \in (I_g^l \vee I_g^1), j \in (I_g^1 \vee I_g^{ul}); \\ z_{ij}^g x_{ib} x_{jb'} |b - b'|d, & i \in (I_g^l \vee I_g^1), j \in I_g^l; \end{cases} \\ \forall g \in G, s, s' \in S, b, b' \in B. \quad (18)$$

$$\phi_g = \alpha \sum_{i \in I} D_{gi}^1 + \sum_{i \in I \vee \{0\}} \sum_{j \in I \vee \{0\}} E_{ij}^g, \forall g \in G. \quad (19)$$

$$x_{ib}, y_{gs}, z_{ij}^g \in \{0, 1\}, \forall i, j \in I, b \in B, g \in G, s \in S. \quad (20)$$

$$I_g^1, I_g^2, I_g^{ul}, I_g^l, l_g, r_g \in \mathbf{N}^+, \forall g \in G. \quad (21)$$

$$D_{gi}^1, D_{gi}^2, E_{ij}^g, \phi_g \geq 0, \forall i, j \in I, g \in G. \quad (22)$$

式(1)和(2)为目标函数,其中目标(1)为卸载成本最小化,包括轨道吊移动成本和集卡运输成本;从成本和能耗角度出发,为均衡各轨道吊作业负荷,目标(2)设置最大化移动距离均衡率.在约束条件中,式

(3)~(5)为集装箱贝位分配约束;式(6)~(9)为作业区域划分约束;式(10)~(19)为多轨道吊调度约束.

式(3)表示任一集装箱只能安排于一个箱位.式(4)为贝位容量限制.式(5)为任一集装箱的贝位应在允许间隔范围内.式(6)~(9)约束作业范围的左右界限及其与变量 $y_{gs}$ 间的关系.任一作业范围至少占据一个区域,因此轨道吊1作业区域的左界限必为1, $G$ 作业范围的右界限必为 $S$ .式(10)~(13)为轨道吊直接卸载、间接卸载、吊装和吊卸任务集合.式(14)~(15)为作业顺序约束,即任一轨道吊的任一任务,仅有一个紧前任务和一个紧后任务.式(16)计算了仅发生在直接卸载模式中的轨道吊重载移动距离.式(17)计算了集卡运输距离.式(18)为轨道吊操作两个连续任务时的空驶距离.式(19)计算了轨道吊总移动距离,为平衡化重载操作和空驶操作,借助参数 $\alpha$ 将重载转化为空载操作.式(20)~(22)为变量取值范围.

### 3 算法设计

#### 3.1 算法设计思路

本文所研究的联合优化问题涉及到作业区域划分、集装箱贝位分配与多轨道吊调度3个相互关联的子问题,且均是NP-hard问题<sup>[8,12,15-16,20]</sup>,采用精确解算法难以在合适时间获得最优解,因此,根据问题特点,设计TLHHA求解问题.算法流程框架见图3.

算法设计思路:初始化区域分配,自下而上迭代求解最佳的贝位分配方案、轨道吊调度方案与 $f_1$ ;然后将其返回至第1层算法,判断 $f_2$ 是否达到可接受均衡率 $\xi$ ,若不满足,则自上而下迭代.从而,层层循环迭代使得两目标 $f_1$ 和 $f_2$ 均取得最优值.第1层采用启发式规则解决作业区域划分问题,设置可接受均衡率为整体算法终止条件;第2层运用模拟退火算法解决集装箱贝位分配问题,终止条件为结束温度;第3层利用遗传算法求解多轨道吊调度问题,终止条件为最大遗传代数.

#### 3.2 算法具体步骤.

step 1: 设置初始参数.

step 2: 初始化作业区域,基于等分作业区域思想,根据式(6)~(9),确定各个轨道吊的作业区域.

step 3: 初始化贝位位置 $S_1$ ,并划分各轨道吊两种卸载模式下的任务集合.第2层算法的初始解按照如下规则生成:首先,在满足约束条件(3)和(5)前提下随机生成贝位位置;其次,判断生成的贝位序列是否满足容量约束,即约束条件(4),若满足,则输出该序列作为初始解 $S_1$ ,否则,重新生成序列.

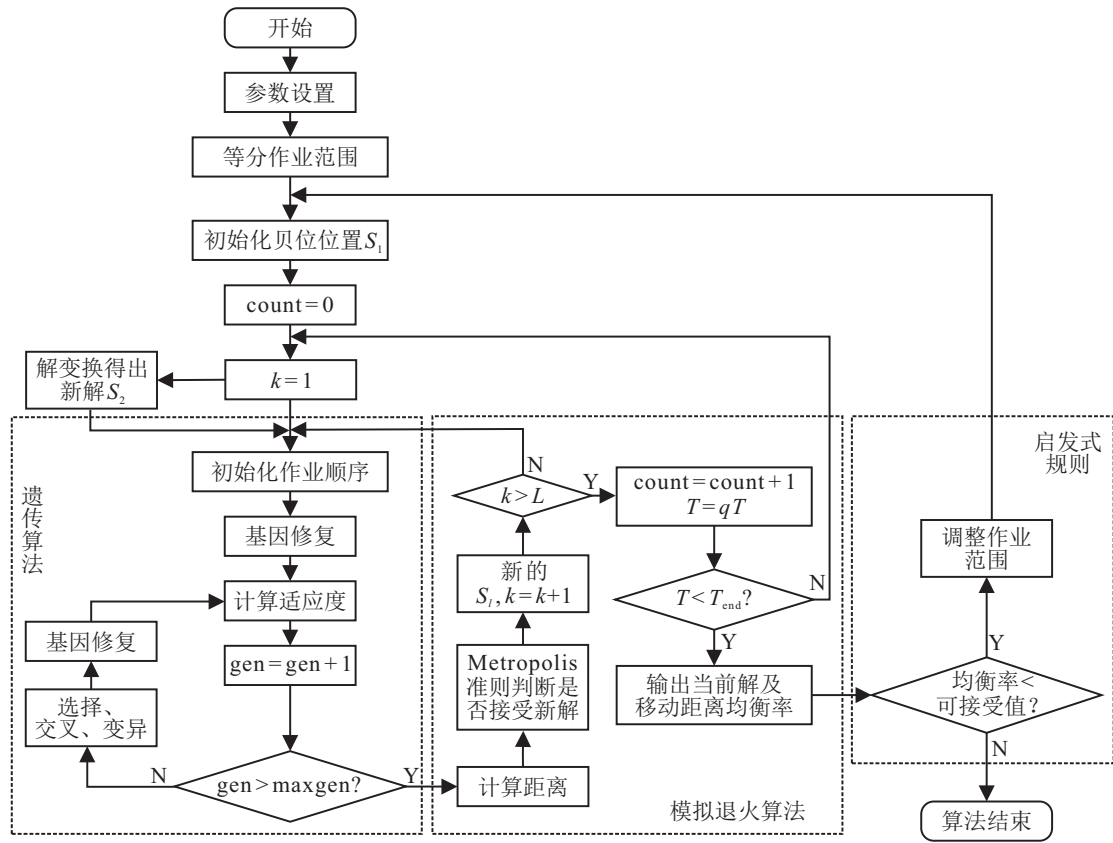


图3 TLHHA流程

step 4: 基于已确定贝位位置和作业区域,根据式(10)~(13)确定各轨道吊作业任务集合与状态,依据式(14)~(15)初始化各轨道吊作业顺序,随机生成初始种群,第2层和第3层算法的染色体编码见图4.前4行为第2层算法编码规则.其中:第1行为任务;第2行为贝位位置;第3行为轨道吊的编号;第4行表示轨道吊作业状态,0表示直接卸载操作,-1表示间接卸载吊卸操作,1表示间接卸载吊装操作;第5行为第3层算法编码规则,即轨道吊作业顺序.

|      |   |   |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------|---|---|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 任务   | 1 | 2 | 3  | 4 | 8 | 3 | 4  | 5  | 6  | 7  | 9  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |
| 贝位   | 5 | 7 | 9  | 7 | 7 | 9 | 7  | 12 | 10 | 15 | 14 | 15 | 7  | 14 | 20 | 20 |
| 轨道吊  | 1 | 1 | 1  | 1 | 1 | 2 | 2  | 2  | 2  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  |
| 作业状态 | 0 | 0 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0  | 0  | -1 | 1  | 1  | -1 | -1 | 0  | 0  |
| 作业顺序 | 2 | 5 | 3  | 1 | 4 | 1 | 3  | 4  | 2  | 6  | 5  | 1  | 5  | 2  | 4  | 3  |

图4 染色体编码示意

step 5: 基因修复. 随机初始化和新种群中的轨道吊作业顺序可能存在不可行解,因此,设计启发式规则,对不可行解进行修复,包括两种情形:

1) 若各轨道吊的第1个任务均为吊装任务时,会导致各轨道吊相互等待,从而使其均无法开始作业,由此产生了不可行解;基因修复原则是仅调换冲突任务的作业顺序,如图5(a)所示,具体做法为按照作业顺序寻找轨道吊1是否有直接卸载任务,若有,则将其与第1个吊装任务进行调换,若无,则以同样的方法寻找下一个轨道吊.

2) 若同一轨道吊先后吊装和吊卸两个任务,对应另一轨道吊以相反顺序吊卸和吊装这两个任务,则会导致这两个轨道吊之间相互等待而无法继续作业. 同1),基因修复方法是仅调换前一轨道吊中两个冲突任务的作业顺序,如图5(b)所示.

|      |   |   |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------|---|---|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 任务   | 1 | 2 | 3  | 4 | 8 | 3 | 4  | 5  | 6  | 7  | 9  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |
| 贝位   | 5 | 7 | 9  | 7 | 7 | 9 | 7  | 12 | 10 | 15 | 14 | 15 | 7  | 14 | 20 | 20 |
| 轨道吊  | 1 | 1 | 1  | 1 | 1 | 2 | 2  | 2  | 2  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  |
| 作业状态 | 0 | 0 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0  | 0  | -1 | 1  | 1  | -1 | -1 | 0  | 0  |
| 作业顺序 | 2 | 5 | 3  | 1 | 4 | 1 | 3  | 4  | 2  | 6  | 5  | 1  | 5  | 2  | 4  | 3  |

(a) 情形1)的基因修复方法

|      |   |   |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------|---|---|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 任务   | 1 | 2 | 3  | 4 | 8 | 3 | 4  | 5  | 6  | 7  | 9  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |
| 贝位   | 5 | 7 | 9  | 7 | 7 | 9 | 7  | 12 | 10 | 15 | 14 | 15 | 7  | 14 | 20 | 20 |
| 轨道吊  | 1 | 1 | 1  | 1 | 1 | 2 | 2  | 2  | 2  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  |
| 作业状态 | 0 | 0 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0  | 0  | -1 | 1  | 1  | -1 | -1 | 0  | 0  |
| 作业顺序 | 1 | 5 | 3  | 2 | 4 | 1 | 3  | 4  | 2  | 6  | 5  | 1  | 5  | 2  | 4  | 3  |

(b) 情形2)的基因修复方法

图5 基因修复示意

step 6: 计算第3层算法适应度函数

$$F = \frac{1}{f_1}, \tag{23}$$

其中  $f_1$  的计算依赖式(16)~(18).

step 7: 判断遗传算法是否满足停止规则,若是,则执行step 9,否则,执行step 8.

step 8: 进行遗传操作,包括选择、交叉和变异操作,并利用 step 5 中的方法修复不可行解,得到第3层算法的新种群,返回 step 6; 由于该层算法仅涉及到各任务作业顺序,遗传操作仅需对作业顺序编码进行染色体选择和基因变换。

step 8.1: 选择操作,轮盘赌算子。

step 8.2 交叉操作,针对多轨道吊作业顺序调度问题,为降低遗传操作的复杂性和解的不可行性,选用顺序交叉算子<sup>[21]</sup>。

step 8.3 变异操作,采用交换变异算子<sup>[21]</sup>,即随机选取两个子串,并交换其位置。为保持变异后个体的可行性,所选取的两个子串应为同一轨道吊的作业序列。

step 9: 输出第3层算法的最优解,并计算  $\phi_g$ 。

step 10: 对第2层模拟退火算法的当前解  $S_1$  随机扰动产生一个新解  $S_2$ , 重复 step 4 ~ step 9。新解产生方法如下:在编码中,随机产生两个位置,调换这两个位置的贝位,见图6;交换之后,可能会改变任务的作业模式和状态,因此邻域搜索可能导致解是变长度的。同样,判断新解  $S_2$  交换的两个位置的贝位是否满足界限范围,即式(5),若不满足,则重新生成新解。

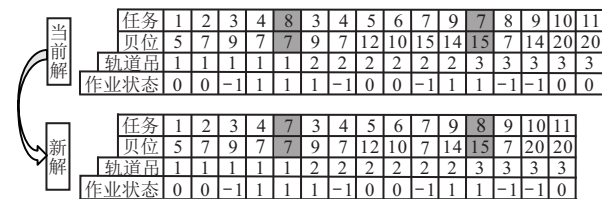


图6 模拟退火算法新解产生示意

step 11: 计算  $S_2$  的增量  $df = f_1(S_2) - f_1(S_1)$ 。

step 12: 若  $df < 0$ , 则接受  $S_2$  为新当前解; 否则, 在  $(0,1)$  区间内随机产生一个均匀分布的随机数  $r$ , 并计算  $S_2$  的接受概率, 即若  $\exp(-df/T) > r$ , 则接受  $S_2$  为新当前解, 否则, 保留当前解  $S_1$ 。

step 13: 若满足第2层算法终止条件, 则输出当前解为最优解, 结束第2层算法, 并计算各轨道吊的移动距离均衡率, 执行 step 14; 否则, 返回 step 10。

step 14: 判断移动距离均衡率  $f_2$  是否可接受, 即判断是否满足条件  $f_2 \geq \xi$ , 若满足, 则整个算法结束。

step 15: 利用启发式规则改变作业区域, 即

$$N_{gg'} = \lceil \min(K_g, |K_{g'}|) / (\phi_g / n_g) \rceil, \quad \forall g, g' \in G \setminus \{(g, g') | K_g \leq 0, K_{g'} \geq 0\}. \quad (24)$$

规则是压缩移动距离大于平均移动距离的轨道吊作业区域, 给移动距离小于平均值的轨道吊扩充  $N_{gg'}$  区域, 利用式(6)~(9)调整作业区域, 返

回 step 3。其中:  $N_{gg'}$  为轨道吊  $g$  调整给  $g'$  的区域个数,  $K_g$  为轨道吊  $g$  移动距离与平均值的差值,  $n_g$  为轨道吊  $g$  的作业区域数。

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述

中心站停靠一列具有45节车厢的列车, 其中有30个集装箱待卸载, 每条装卸线配备3台轨道吊, 装卸线堆场规模为35贝×5排×4层, 每贝预留3个箱位供翻倒箱需要, 各贝位已堆存集装箱情况如表1所示, 待卸载任务的车辆位置见表2。利用 TLHHA 求解问题, 设定遗传算法的种群规模为200, 交叉概率为0.9, 变异概率为0.05, 最大迭代次数为500; 模拟退火算法的初始温度为2000, 降温速率为0.9, 终止温度为  $1e-3$ , 各温度下的 Metropolis 链长为50; 可接受的作业均衡率为80%。

表1 各贝位已堆存集装箱数

| 贝位 | 数量 | 贝位 | 数量 | 贝位 | 数量 | 贝位 | 数量 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 7  | 10 | 11 | 19 | 8  | 28 | 11 |
| 2  | 12 | 11 | 13 | 20 | 4  | 29 | 9  |
| 3  | 9  | 12 | 7  | 21 | 6  | 30 | 10 |
| 4  | 10 | 13 | 8  | 22 | 9  | 31 | 13 |
| 5  | 15 | 14 | 8  | 23 | 14 | 32 | 8  |
| 6  | 11 | 15 | 10 | 24 | 12 | 33 | 12 |
| 7  | 6  | 16 | 9  | 25 | 8  | 34 | 4  |
| 8  | 8  | 17 | 9  | 26 | 10 | 35 | 15 |
| 9  | 5  | 18 | 11 | 27 | 7  |    |    |

表2 各任务的车厢位置

| 任务 | 车厢 | 任务 | 车厢 | 任务 | 车厢 | 任务 | 车厢 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 2  | 9  | 14 | 17 | 27 | 25 | 38 |
| 2  | 3  | 10 | 15 | 18 | 28 | 26 | 39 |
| 3  | 4  | 11 | 16 | 19 | 30 | 27 | 40 |
| 4  | 6  | 12 | 18 | 20 | 31 | 28 | 42 |
| 5  | 7  | 13 | 19 | 21 | 33 | 29 | 43 |
| 6  | 8  | 14 | 21 | 22 | 35 | 30 | 45 |
| 7  | 9  | 15 | 23 | 23 | 36 |    |    |
| 8  | 12 | 16 | 25 | 24 | 37 |    |    |

### 4.2 算例结果

利用 MatlabR2014a 编写算法程序, 运用 Windows10 操作系统的 i7-3770CPU 处理器进行运算, 3层算法共耗时 797.18 s, 3台轨道吊最优作业区域为 [1, 17]、[18, 33]、[34, 45], 作业均衡率为 97.83%, 各轨道吊平衡化后的总移动距离分别为 877.5 m、884 m 和 897 m。第2层模拟退火算法的收敛图见图7, 迭代至78代, 目标收敛于1791.66, 求解出的30个任务的最佳贝位如表3所示; 第3层遗传算法的收敛图见图8, 进化至第163代收敛于1791.66, 最佳轨道吊作业顺序如表4所示。在操作过程, 30个任务被扩伸为43个, 其中17个任务采用直接卸载方式, 13个任

务采用间接卸载方式。

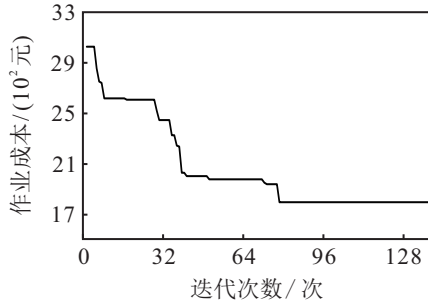


图7 模拟退火算法收敛图

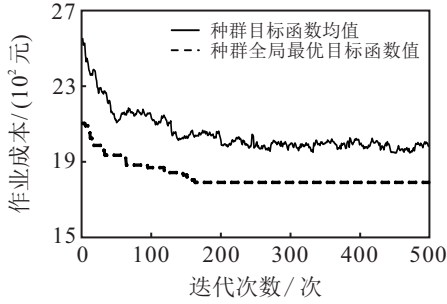


图8 遗传算法收敛图

表3 集装箱贝位分配情况

| 任务 | 贝位 | 任务 | 贝位 | 任务 | 贝位 | 任务 | 贝位 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 1  | 9  | 22 | 17 | 27 | 25 | 34 |
| 2  | 1  | 10 | 22 | 18 | 27 | 26 | 29 |
| 3  | 3  | 11 | 25 | 19 | 29 | 27 | 31 |
| 4  | 6  | 12 | 18 | 20 | 32 | 28 | 34 |
| 5  | 5  | 13 | 19 | 21 | 34 | 29 | 33 |
| 6  | 9  | 14 | 14 | 22 | 30 | 30 | 35 |
| 7  | 13 | 15 | 17 | 23 | 28 |    |    |
| 8  | 21 | 16 | 24 | 24 | 27 |    |    |

表4 轨道吊调度方案

| 轨道吊  | 作业量 | 任务作业顺序(作业状态)                            |
|------|-----|---|
| 轨道吊1 | 13  | 3(0)→1(0)→2(0)→7(0)→9(-1)→10(-1)→8(-1)→ |
|      |     | 5(0)→4(0)→6(0)→11(-1)→15(1)→14(1)       |
| 轨道吊2 | 20  | 15(-1)→11(1)→16(0)→18(0)→8(1)→17(0)→    |
|      |     | 21(-1)→22(1)→26(1)→20(0)→19(0)→23(1)→   |
|      |     | 27(1)→29(1)→24(1)→12(0)→13(0)→14(-1)→   |
|      |     | 10(1)→9(1)                              |
| 轨道吊3 | 10  | 28(0)→30(0)→21(1)→24(-1)→23(-1)→22(-1)  |
|      |     | →25(0)→27(-1)→26(-1)→29(-1)             |

### 4.3 模型与算法性能测试

#### 4.3.1 不同划分原则下的对比实验

为验证所研究问题的优越性,在同一算例下,计算不同划分策略下的实验结果,并进行比较分析,结果见表5.等分作业范围下,作业均衡率为51.79%,作业成本为2 130.1元.等分任务量划分原则下的均衡率仅50.84%,作业成本为2 257.62元.与两种传统划分原则相比,动态作业范围下,作业均衡率GAP高达88.90%和92.43%,作业成本可分别减少15.89%和20.64%.由此可见,本文提出的动态划分原则可有效提高各轨道吊的作业均衡率,降低中心站运营成本.具体分析作业成本结构可知,3种划分策略下集卡运输成本相差不大,而轨道吊的移动成本差别较大,从而导致总作业成本有着明显的差距,原因在于集卡单位运输成本远小于轨道吊单位移动成本.

表5 不同划分原则的实验结果对比

| 结果           | 新型划分原则   | 传统划分原则   |           | 不划分原则    |
|--------------|----------|----------|-----------|----------|
|              | 动态作业范围   | 等分作业范围   | 等分任务量作业范围 |          |
| 作业范围         | [1,17]   | [1,15]   | [1,15]    | —        |
|              | [18,33]  | [16,30]  | [16,31]   | —        |
|              | [34,45]  | [31,45]  | [32,45]   | —        |
| 均衡率/%        | 97.83    | 51.79    | 50.84     | 37.38    |
| 作业成本/元       | 1 791.66 | 2 130.10 | 2 257.62  | 2 645.50 |
| 轨道吊移动成本/元    | 1 690    | 2 015    | 2 145     | 2 645.50 |
| 集卡运输成本/元     | 101.66   | 115.1    | 112.62    | —        |
| 作业成本降低百分比/%  | —        | 15.89    | 20.64     | 32.28    |
| 作业均衡率提高百分比/% | —        | 88.90    | 92.43     | 161.72   |

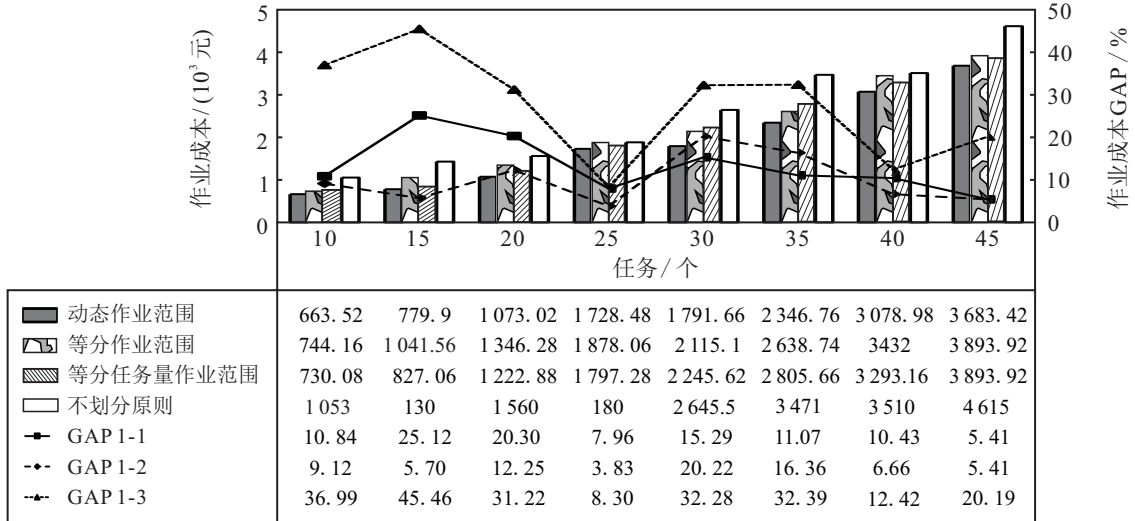
另外,表5对不划分作业区域原则下的实验结果进行求解,即不设置作业区域,各轨道吊可在整个作业区域内进行装卸和堆垛操作.为保证轨道吊作业任务量基本均衡,在此原则下,采用平均分配思想,将30个任务平均分配给3台轨道吊.不划分原则与新型

和传统划分原则的区别在于前者卸载任务方式仅采用直接卸载模式,不存在间接卸载.由实验结果可知,在不划分原则下,由于任务的重空载操作全部由轨道吊完成,导致移动成本较高,而动态作业范围可将其降低32.28%.另外,在不划分原则下,作业均衡率仅

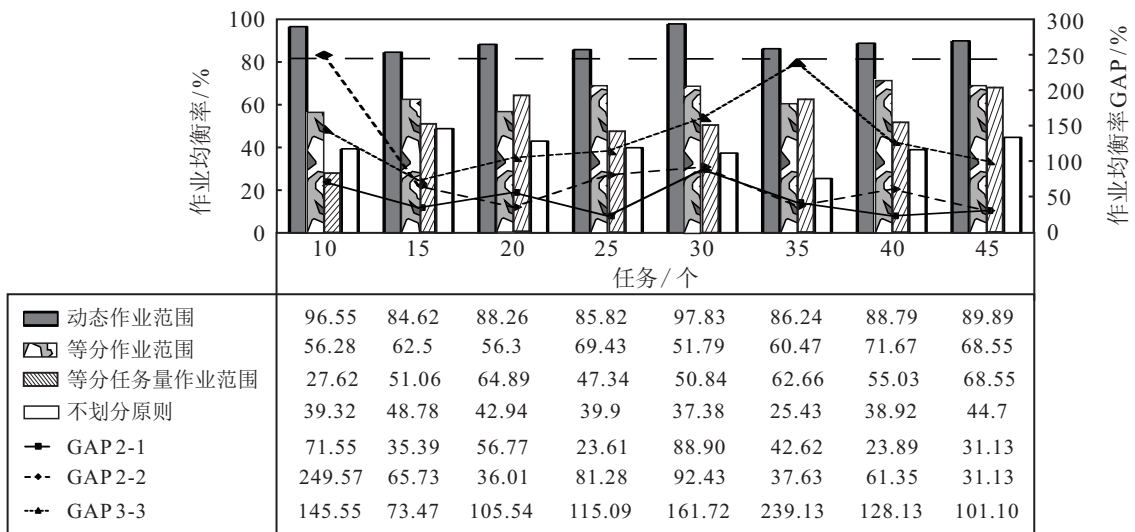
为37.38%,新型划分原则可将其提升161.72%。由此,可看出新型划分原则基于“轨道吊-集卡”方案,利用灵活性更高、运输成本更低的集卡代替轨道吊的重载移动,综合利用直接卸载和间接卸载两种作业模式,可有效解放轨道吊作业压力,达到降低中心站资

源过度负载、减少作业成本的目的。

为进一步验证本文提出模型与算法的有效性与普适性,对不同规模任务进行实验,保持其他参数取值不变,仅改变待卸载集装箱任务数量及其所在车厢位置,实验结果如图9所示。



(a) 作业成本及GAP值



(b) 作业均衡率及GAP值

图9 不同规模下4种划分原则的实验结果对比

图9中:GAP1-1(GAP2-1)、GAP1-2(GAP2-2)与GAP1-3(GAP2-3)分别代表与等分作业范围、等分任务量作业范围、不划分原则相比,动态作业范围降低(提高)的作业成本(均衡率)百分比。首先,由图9(a)可知,在任一规模下,动态作业范围下的作业成本均最低,GAP介于3.83%~45.46%,而不划分原则下的作业成本均最高。可见,基于新型划分原则,采用“轨道吊-集卡”的装卸方案更具备经济性。其次,在任一规模下,新型划分原则下的作业均衡率均大于80%,最高达97.83%,而在不划分原则和传统划分原则下,均

均衡率均未达到可接受值,GAP最高达到了249.57%,最低为23.61%。因此,新型划分原则综合考虑任务位置以及轨道吊重载和空载操作,以轨道吊移动距离为衡量标准,可有效促进中心站作业均衡。即在任一规模下,基于作业区域动态划分得到的贝位分配和多轨道吊调度方案比其他两种划分原则更优。

### 4.3.2 模型正确性和算法有效性验证

为验证模型的正确性和算法的有效性,利用Cplex求解不同规模下的实验结果,并与本文设计的TLHHA的求解结果进行对比,结果如表6所示。由于

表 6 不同划分原则的实验结果对比

| 规模 | Cplex    |          |         | TLHHA   | GAP/% |       |        |
|----|----------|----------|---------|---------|-------|-------|--------|
|    | $f_1$ /元 | $f_2$ /% | CPU/s   | CPU/s   | $f_1$ | $f_2$ | CPU    |
| 10 | 651.68   | 94.24    | 45.75   | 40.63   | 1.82  | 2.46  | -11.19 |
| 15 | 772.08   | 86.11    | 114.72  | 90.55   | 1.01  | -1.17 | -21.07 |
| 20 | 1055.20  | 86.81    | 414.73  | 251.11  | 1.69  | 1.67  | -39.45 |
| 25 | 1675.98  | 84.66    | 1028.27 | 468.63  | 3.13  | 1.37  | -54.44 |
| 30 | 1750.48  | 94.14    | 2942.43 | 797.18  | 2.12  | 3.92  | -71.91 |
| 35 | 2261.20  | 87.47    | 5811.31 | 1136.97 | 3.78  | -1.41 | -80.44 |
| 40 | —        | —        | >7200   | 1929.41 | —     | —     | —      |
| 45 | —        | —        | >7200   | 2342.63 | —     | —     | —      |

不同规模下 TLHHA 求解结果已于图 9 表示, 在表 6 中不再重复展示, 仅展示 TLHHA 求解所用时间, 其中  $GAP = (TLHHA - Cplex) / TLHHA$ .

由于多目标规划模型无法利用 Cplex 求解器直接求解, 需对模型 [M1] 进行适当变形<sup>[22]</sup>, 构建模型 [M2] 如下:

$$\min\{f_1 | \min f_2 \geq \xi, [M1]\}. \quad (25)$$

将模型 [M1] 的目标函数  $f_1$  作为模型 [M2] 的优化目标, 令  $f_2$  的最小值不小于可接受均衡率  $\xi$  作为模型 [M2] 的约束条件, 其余约束条件同模型 [M1]. 此外, 由于式 (10)~(18) 均涉及变集合  $I_g^1, I_g^2, I_g^{ul}$  与  $I_g^l$ , 在 Cplex 求解器中无法处理, 因此, 在模型 [M2] 中, 将这些变集合设为 0-1 变量, 即分别设为  $u_{ig}^1, u_{ig}^2, u_{ig}^{ul}$  与  $u_{ig}^l$ , 表示轨道吊操作任务  $i$  的状态.

由表 6 可知, 利用 Cplex 可求解出模型 [M2] 的实验结果, 可证明本文所构建模型的正确性. 此外, 当算例规模较小时, TLHHA 求解的目标函数值与 Cplex 精确解是十分接近的,  $f_1$  和  $f_2$  的 GAP 平均值为 2.26% 和 1.53%, 由此可见本文所设计的 TLHHA 算法的有效性. 然而, 随着任务规模增大, 问题的复杂性也成倍增长, 与 Cplex 相比, TLHHA 节省的 CPU 逐渐增大, 当任务规模大于 35 时, Cplex 在有限时间 7200 s 内无法求出精确解, 可证明 TLHHA 算法具备较好的寻优能力.

### 4.3.3 联合优化策略与独立优化策略的对比实验

为验证本文提出的联合优化方法的优越性, 在相同作业区域下, 经过 10 次实验, 计算联合优化与独立优化两种策略实验结果, 如表 7 所示. 独立优化策略是基于初始贝位方案和已知作业区域, 计算最优的轨道吊作业顺序, 而不考虑轨道吊调度方案对贝位分配结果的反作用. 通过对两种策略实验结果对比可知, 与独立优化策略相比, 联合优化策略可降低 37.71% 的作业成本, 提高 41.92% 的作业均衡率, 前者的平均

作业均衡率未达到可接受值. 此外, 联合优化策略下的标准方差均小于前者. 因此, 联合优化策略综合考虑贝位分配与轨道吊调度两个子问题的关联性, 通过相互之间的反馈作用, 从而使得两个子问题均可取得最优结果, 并且标准方差指标体现了本文所构建模型与算法的稳定性和有效性.

表 7 联合优化策略与独立优化策略的实验结果对比

| 实验次数 | 联合优化策略   |          | 独立优化策略   |          | GAP/% |       |
|------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|
|      | $f_2$ /% | $f_1$ /元 | $f_2$ /% | $f_1$ /元 | $f_1$ | $f_2$ |
| 1    | 90.44    | 1826.12  | 62.18    | 2873.88  | 45.45 | 36.65 |
| 2    | 89.55    | 1883.24  | 65.89    | 2937.14  | 35.91 | 35.88 |
| 3    | 97.83    | 1791.66  | 69.10    | 3026.52  | 41.58 | 40.80 |
| 4    | 89.78    | 1819.34  | 64.19    | 2915.02  | 39.87 | 37.59 |
| 5    | 87.41    | 1844.80  | 56.79    | 2942.12  | 53.92 | 37.30 |
| 6    | 94.48    | 1873.88  | 63.41    | 2985.38  | 49.00 | 37.23 |
| 7    | 90.74    | 1882.28  | 63.60    | 2927.79  | 42.67 | 35.71 |
| 8    | 91.14    | 1834.90  | 69.71    | 3017.34  | 30.74 | 39.19 |
| 9    | 87.60    | 1810.38  | 61.76    | 3010.00  | 41.84 | 39.86 |
| 10   | 89.62    | 1810.12  | 64.85    | 2877.28  | 38.20 | 37.09 |
| 平均值  | 90.86    | 1837.69  | 64.15    | 2951.25  | 41.92 | 37.71 |
| 标准偏差 | 2.98     | 30.89    | 3.51     | 53.18    | 6.22  | 1.62  |

### 4.3.4 不同 H 值的灵敏度分析

为进一步验证本文提出的动态作业区域下的贝位分配及轨道吊调度协同优化方案的优越性, 计算不同 H 值下的作业成本、作业均衡率以及轨道吊与集卡的移动距离, 实验结果如图 10 所示.

由图 10 可知, 当 H 取值不同时, 作业成本和均衡率均不同, 但均衡率均大于 80%. H 取值为 11 时, 卸载成本最低, 为 1790.22 元, 作业均衡率为 88.13%, 而 H 值为 10 时, 均衡率高达 97.83%, 且成本仅为 1791.66 元. 此外, 由图 10(a) 可看出, 作业成本总体上呈先下降后上升的趋势, H 值较小时, 作业成本较高, 这是由于任务被分配的贝位距离其车厢较近, 任务多由轨道吊采用直接卸载方式完成卸载和堆垛, 此时轨

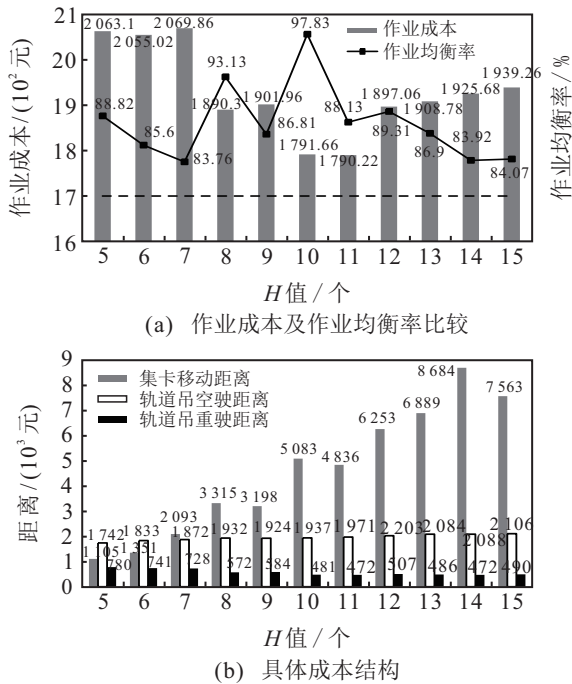


图10 不同 $H$ 值下的实验结果对比

道吊重驶距离较大,集卡运输距离较小,而轨道吊单位重载移动成本远高于集卡,导致作业成本较高;而 $H$ 值较大时,贝位位置可能距离其在所在车厢位置较远,从而跨越了单个轨道吊的作业范围,需采用间接卸载方式完成操作,此时操作成本高、机动性差的轨道吊重载移动由灵活性更高、操作成本更低的集卡代替完成.因此,由图10(b)可知,随着 $H$ 值增大,总体上,集卡移动距离呈现逐渐上升的趋势,而轨道吊移动距离呈现逐渐下降的趋势.此外,合理的作业顺序调度使得轨道吊空驶距离相差不大,趋势较平稳.

## 5 结论

本文从中心站资源布局和作业特点,研究主作业区资源动态配置与调度问题,基于“轨道吊-集卡”装卸方案,以卸载作业为例,考虑间隔约束和作业模式约束,构建作业区域划分、贝位分配与多轨道吊协同调度的联合优化模型,并根据问题特点,融合启发式规则、遗传算法和模拟退火算法,设计TLHHA求解问题.通过将Cplex与TLHHA的求解结果进行对比,验证了模型的正确性和算法的有效性.数值实验结果表明:与传统划分和不划分原则相比,动态划分原则下的贝位分配方案与多轨道吊调度方案更有利于提高中心站作业均衡率,降低作业成本,且“轨道吊-集卡”装卸方案可有效避免中心站资源过度负载.此外,通过综合考虑各子问题间的关联性,联合优化贝位分配与多轨道吊调度问题,可使两子问题同时取得最优解.最后,贝位与车厢间保持合理间隔可有效组合直接卸载和间接卸载两种作业模式,综合利用

主作业区装卸资源,大幅度提升中心站经营效益和资源运营性能.下一步基于“轨道吊-集卡”装卸方案,将集卡数量配置和分配问题考虑到联合优化问题中,尝试实现4层资源分配和作业调度的集成优化问题,并设置经济、能耗和效率3个目标,对不同优化目标进行比较分析.

## 参考文献(References)

- [1] 王小寒, 廉凯歌, 张海萍, 等. 铁路场站轨道吊动态配置及其与集卡协同调度[J/OL]. [2020-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200511.1534.014.html>. (Wang X H, Lian K G, Zhang H P, et al. Dynamic gantry crane allocation and integrated scheduling with truck in the railway container terminal[J/OL]. [2020-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200511.1534.014.html>.)
- [2] 张灿荣, 钟明, 缪立新. 集装箱场内箱位分配问题[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2015, 55(10): 1150-1156. (Zhang C R, Zhong M, Miao L X. Location assignments for outbound containers in container terminals[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2015, 55(10): 1150-1156.)
- [3] Chen L, Lu Z Q. The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal[J]. International of Production Economics, 2012, 135(1): 73-80.
- [4] 崔东方, 梁承姬. 混堆模式下集装箱堆场贝位分配问题研究[J]. 安徽工业大学学报: 自然科学版, 2013, 30(2): 213-218. (Cui D F, Liang C J. Dynamic storage space allocation strategy for containers based on hybrid stack mode[J]. Journal of Anhui University of Technology: Natural Science, 2013, 30(2): 213-218.)
- [5] Guo P, Cheng W M, Zhang Z Q, et al. Gantry crane scheduling with interference constraints in railway container terminals[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2013, 6(2): 244-260.
- [6] Guo P, Cheng W M, Wang Y, et al. Gantry crane scheduling in intermodal rail-road container terminal[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(16): 5419-5436.
- [7] 王力, 朱晓宁, 闫伟, 等. 铁路集装箱中心站轨道吊调度优化模型与算法[J]. 铁道学报, 2014, 36(5): 8-13. (Wang L, Zhu X N, Yan W, et al. Optimization model and algorithm of rail mounted gantry crane scheduling at railway container terminals[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(5): 8-13.)

- [8] Wang L, Zhu X N. Rail mounted gantry crane scheduling optimization in railway container terminal based on hybrid handling mode[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2014, 2014: 682486.
- [9] Chang Y M, Zhu X N, Yan B C, et al. Integrated scheduling of handling operations in railway container terminals[J]. Transportation Letters, 2019, 11(7): 402-412.
- [10] Yan B C, Zhu X N, Wang L, et al. Integrated scheduling of rail-mounted gantry cranes, internal trucks and reach stackers in railway operation area of container terminal[J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(9): 47-58.
- [11] Fedtke S, Boysen N. Gantry crane and shuttle car scheduling in modern rail-rail transshipment yards[J]. OR Spectrum, 2017, 39(2): 473-503.
- [12] Boysen N, Flidner M, Kellner M. Determining fixed crane areas in rail-rail transshipment yards[J]. Transportation Research Part E, 2009, 46(6): 1005-1016.
- [13] Boysen N, Flidner M. Determining crane areas in intermodal transshipment yards: The yard partition problem[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 204(2): 336-342.
- [14] Boysen N, Emde S, Flidner M. Determining crane areas for balancing workload among interfering and noninterfering cranes[J]. Naval Research Logistics, 2012, 59(8): 656-662.
- [15] 范厚明, 姚茜, 马梦知. 多场桥分区域平衡策划下的集装箱堆场箱位分配问题[J]. 控制与决策, 2016, 31(9): 1603-1608.  
(Fan H M, Yao X, Ma M Z. Storage space allocation based on regional workload balance planning of multiple yard cranes in container terminal yard[J]. Control and Decision, 2016, 32(9): 1603-1608.)
- [16] 范厚明, 马梦知, 姚茜, 等. 集装箱堆场箱位分配及多场桥调度协同优化问题[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(11): 1367-1373.  
(Fan H M, Ma M Z, Yao X, et al. Integrated optimization of storage space allocation and multiple yard cranes scheduling in a container terminal yard[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(11): 1367-1373.)
- [17] 唐连生, 郭鹏. 铁路集装箱中心站装卸设备优化调度研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(2): 211-214.  
(Tang L S, Guo P. Study of loading/unloading equipment optimization scheduling in railway container terminal[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(2): 211-214.)
- [18] Chung S H, Chan Felix T S. A workload balancing genetic algorithm for the quay crane scheduling problem[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(16): 4820-4834.
- [19] 赵磊, 胡志华, 李淑琴. 基于作业均衡的集装箱堆场箱区场桥作业调度[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(1): 69-74.  
(Zhao L, Hu Z H, Li S Q. Container yard crane scheduling for operations balance between yard cranes[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(1): 69-74.)
- [20] Stephan K, Boysen N. Crane scheduling in railway yards: An analysis of computational complexity[J]. Journal of Scheduling, 2017, 20(5): 507-526.
- [21] He J L, Huang Y F, Yan W, et al. Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(5): 2464-2487.
- [22] 刘婵娟, 胡志华. 集装箱堆场出口箱箱位分配多目标优化模型[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(6): 589-596.  
(Liu C J, Hu Z H. Multi-objective optimization model for storage location allocation of outbound containers at container yard[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(6): 589-596.)

## 作者简介

王小寒(1993—), 女, 博士生, 从事物流工程与管理的研究, E-mail: 1002924430@qq.com;

贾玉林(1996—), 男, 硕士生, 从事交通运输工程的研究, E-mail: 18334752256@163.com;

蔡佳芯(1995—), 女, 博士生, 从事物流工程与管理的研究, E-mail: 15021838052@163.com;

靳志宏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流系统优化与模拟仿真等研究, E-mail: jinzhihong@dlmu.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)