

# 基于滚动计划的跨运车作业序列优化

庄沁汐 韩晓龙

(上海海事大学物流科学与工程研究院 上海 201306)

**摘要** 自动跨运车(Automated Straddle Carrier)是一种自动化集装箱码头水平作业设备,可独立在岸桥与堆场之间拾放集装箱。将自动化码头跨运车的作业调度问题转化为同时取货送货的车辆路径问题,以最小化完成时间为目标,建立基于滚动计划的跨运车作业分配的混合整数规划模型,结合改进挥发系数的蚁群算法,优化跨运车的作业序列。通过实验分析,得出码头运作时需配置的跨运车的数量和最优的计划期长度。

**关键词** 自动化集装箱码头 自动跨运车 蚁群算法 滚动计划法

**中图分类号** TP3 **文献标志码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.03.016

## OPERATION SEQUENCE OPTIMIZATION OF STRADDLE CARRIER BASED ON ROLLING PLAN

Zhuang Qinxi Han Xiaolong

(Shanghai Maritime University Logistics Science and Engineering Research Institute, Shanghai 201306, China)

**Abstract** Automated straddle carrier is a kind of automatic horizontal operation equipment for container terminals, which can pick and place containers independently between quayside bridge and storage yard. In this paper, the job scheduling problem of automatic terminal straddle carriers was transformed into the vehicle routing problem of simultaneous pick-up and delivery. With the goal of minimizing the completion time, a mixed integer programming model for the assignment of straddle carriers based on rolling plan was established. Combined with ant colony algorithm with improved volatilization coefficient, the job sequence of straddle carriers was optimized. Through experimental analysis, the number of straddle carriers and the optimal planning period length were obtained.

**Keywords** Automated container terminal Automated straddle carrier Ant colony algorithm Rolling plan method

## 0 引言

近几年,由于集装箱化和世界贸易的增加,到达集装箱码头的集装箱船的数量和频率都在稳步增加。集装箱码头亟需提升其运载更多大型集装箱船舶的能力,以提高生产率、降低码头运营成本。集装箱跨运车是一种在集装箱码头前沿和堆场之间搬运、堆码集装箱的专用机械;具有机动性强、作业灵活的优点,一台机可完成包括自取、搬运、堆垛、装卸等多种作业,节能环保、维护成本低,在船舶大型化和码头自动化不断发展的今天,采用智能跨运车作为水平运输的方式具有非常强的竞争力。

关于自动化码头的研究,国内外专家做出了重要

贡献,文献[1]研究出垂直于海侧的堆场布局适合使用跨运车的码头;文献[2]研究不确定情况下跨运车任务分配策略,得出重新安排新的和未执行的职位组合(RCJ)策略适合长期计划;文献[3]将跨运车调度问题转化成同时取货送货问题,提出FFFI算法确定跨运车的作业序列;文献[4]以最小化船只的周转时间为目标,研究跨运车的路径和暂存区的容量,并以实际案例,研究了每个岸桥所需要的跨运车的数量,该文章中跨运车队服务特定的岸桥,效率较低。文献[5]验证了带时间窗约束的双小车岸桥对于AGV调度优化的优越性,并找出存在缓存区时AGV的数量配置和分派调度优化方案。文献[6]考虑了有限缓冲空间下,对比使用ALV和AGV调度方案的作业总成本,验证了ALV在有限缓冲情况下比AGV有更好的性能;文献

[7]提出基于触发事件的 ALV 作业任务实时分配方式,弥补先到先服务分配方式,并验证了 A\* 算法在解决此问题的优越性。文献[8]在考虑岸桥缓存区容量限制的基础上,建立了多目标的 ALV 调度混合整数规划模型,分析出采用 ALV 作为水平运输设备和在岸桥下方设置缓存区对提高设备作业的连贯性和协调性,减少岸桥等待时间和提高港口作业效率有着重要作用。文献[9]考虑 ALV 装卸事件发生的时间序列及岸桥装卸事件时间窗约束,建立双目标混合整数规划模型,对 ALV 执行任务的序列进行优化,ALV 总时间成本总是随时间窗的增大而减少,且 ALV 车速越大,对于时间窗变化的适应性越强。

多运输设备作业分配问题可以转化成同时取货送货的多车辆路径问题,关于此类问题解决方法的研究,文献[10]针对我国城市中心区域路况较拥堵的实际情况,设计基于车辆行驶路段的速度计算方法,建立以最小化总油耗费用为目标的绿色多车场车辆路径问题模型,提出一种融合蚁群优化算法(Ant Colony Optimization, ACO)与知识模型的学习型蚁群优化算法(Learning Ant Colony Optimization, LACO)进行求解;文献[11]提出模糊 C 均值聚类单亲遗传算法求解多旅行商问题;文献[12]改进了蚁群算法,提高算法质量和收敛速度,在车辆路径问题上有良好的效果;文献[13]改进了蚁群算法,研究了多蚁群算法在移动机器人路径规划中的应用;文献[14]更新蚁群算法搜索机制,引入惩罚因子和遗传变异因子,研究了改进蚁群算法在 AGV 路径规划上的应用。码头调度在实际中经常要面临非常复杂的不确定性,这就使得静态调度优化方法经常难以满足需要,滚动计划法可以提高码头应对突发状况的灵活性,文献[15]针对带有软时间窗的车辆路劲问题,提出萤火虫算法与蚁群算法混合来突破原有算法的瓶颈;文献[16]建立了滚动的企业生产计划体系,以加工时间最短为目标,建立了循环组的排序模型,应用蚁群算法求解,达到缩短生产周期、降低企业成本的目的;文献[17]研究了滚动窗口策略在场桥、岸桥集卡的联合和自动引导车等设备调度的应用,讨论了以时间长度为窗口的滚动窗策略的优越性;文献[18]基于滚动计划考虑了翻箱作业,优化了码头取箱装船过程;文献[19]讨论了三日滚动计划在港口生产调度管理中的应用。

目前研究中涉及跨运车调度的文章较少,对跨运车码头的研究以单程运输为主,进出口同时调度仍有待深入研究。关于滚动计划法,目前研究滚动计划法在生产计划的应用文章较多,且在提高生产过程的柔性方面表现较好,而码头的运作复杂性较高,应用滚动

计划法的研究相对较少。跨运车的运作灵活度和随机性较高,其调度过程可看作是多车辆路径问题(mTSP问题),突发事件对跨运车调度方案有着极大的影响,为了提高作业的效率,通过应用滚动计划法以提高跨运车码头的柔性,使码头更加从容地面对突发事件。

## 1 问题描述

跨运车码头与传统码头作业模式不同,自动跨运车将集装箱从任务的起点位置拾取,携箱运输到该任务的终点,这种自动化作业模式解放了劳动力的同时提高了码头的运作效率。为研究自动跨运车集装箱码头作业序列做出以下设置,岸桥选择先作业进口箱后作业出口箱的装卸模式,岸桥暂存区是岸桥可以将集装箱缓存的空间,如果暂存区已满,则岸桥的卸箱作业和跨运车的出口箱作业会产生相应的等待时间。跨运车被分配来完成集装箱从岸边到堆场之间的移动,在这种方法中,有一组跨运车队服务码头上所有工作的岸桥,及所有有移动需求的进出口集装箱。跨运车的进口箱作业是指从进口暂存区将集装箱运送到进口箱区,出口箱作业是指从出口箱区将有出口需求的集装箱运送到出口暂存区中,跨运车在每完成一个进口任务后,选择一个待出口任务。跨运车的运作可以看作是同时取箱送箱的多车辆路径规划问题(VRPSPD)。

图1为一个选用自动跨运车的集装箱码头的平面示意图。为了方便计算跨运车的行驶路径,考虑纵横两个方向建立坐标系。每个岸桥对应1个堆场,每个堆场由4个进口箱区和4个出口箱区组成。在运作过程中,跨运车以相同的效率按规定的轨道行驶,转弯的时间不计,已知进出口集装箱在堆场的位置坐标,因此跨运车的运输时间是可以计算的,调度过程中不考虑翻箱操作。

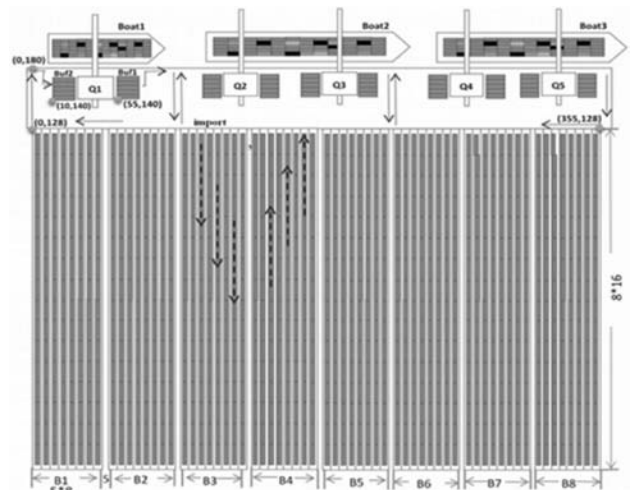


图1 码头分布示意图

由于整个码头工作流程的复杂性,工作任务会因为突发事件的发生,和新任务的增加而变化。为了增加调度安排的实用性,选用滚动计划法安排集装箱任务,将一段计划期内的任务安排给跨运车和岸桥,码头的运作规则遵循共享资源、提高效率的原则,及所有岸桥共享跨运车资源。在运作一个计划期后,岸桥、跨运车在最后一个任务的结束状态等待下一个任务指令,将本计划期内未完成的任务和下期新增加的任务根据重组安排,作为下一个计划期的任务。其中将跨运车未完成的任务与新任务组合,由蚁群算法得出的跨运车作业序列作业;岸桥未完成作业,安排在下期岸桥新增进口箱作业完成后,新增出口箱作业之前完成,以此往复,直到所有的任务都完成。本文以码头作业完成时间最短为大目标,以每个计划期内跨运车完工时间最小化为小目标,通过改进蚁群算法,找出跨运车作业序列,再对码头运作模式进行分析,最合适的跨运车数量和滚动期是本文的宗旨。

## 2 滚动计划模型

### 2.1 参数符号定义

#### 1) 集合与索引。

$Q$ :岸桥的集合, $q \in Q$ ;  $K$ :跨运车的集合, $k \in K$ ;  $I$ :集装箱任务集合, $i, j \in I$ ;  $B$ :岸桥暂存区位置集合;  $Y_1$ ,  $Y_2$ :进出口堆场的可用位置集合; 计划期  $p$  内任务集合  $I_p$ , 由上期未完成的任务和本期计划任务组成,  $p \in P$ ;  $IK$ :岸桥的作业序列集合  $k \in K, i \in I$ ; 计划期  $p$  内新增任务集合  $c_p^{\text{new}}$ , 其中进口箱任务集合为  $c_p^1$ , 出口任务集合为  $c_p^2$ 。

AT 为总工作时间;  $T$  为滚动期周期, 滚动期  $Vt \in \{1, 2, \dots, \frac{AT}{T}\}$ ;  $P$  是计划期  $p \in P$ , 每个计划期由三个滚动期组成;  $J_i \in \{0, 1\}$  表示作业  $i$  是进口箱任务时值为 1, 否则为 0, 其中  $i \in I$ ;  $x_{qi} \in \{0, 1\}$ : 如果岸桥服务集装箱  $i$ , 值为 1, 否则为 0, 其中  $q \in Q, i \in I$ ;  $TQ_i$  是岸桥处理集装箱  $i$  的操作时间;  $TK$  是跨运车拾放一个集装箱的操作时间;  $TK_w$  是跨运车携集装箱  $i$  的作业时间, 及跨运车将一个集装箱任务从起点到终点的时间;  $TK_{ij}$  是跨运车从任务  $i$  的终点到任务  $j$  的起点之间的时间, 及上一个任务到下一个任务之间的空驶时间;  $M$  是一个足够大的数。

#### 2) 辅助变量。

$c_i^{\text{nd}}$ : 计划期  $p$  内未完成的任务集合;  $N_k$ : 跨运车  $k$  的作业序列集合;  $N_q$ : 岸桥  $q$  的作业序列集合;  $S_i^q$ : 岸桥作

业任务  $i$  开始时间;  $F_i^q$ : 岸桥作业任务  $i$  结束时间;  $S_i^k$ : 跨运车作业任务  $i$  开始时间;  $F_i^k$ : 跨运车作业任务  $i$  结束时间;  $F_t$ : 滚动期  $t$  完工时间;  $F_{tk}$  表示滚动期  $t$  内跨运车  $k$  最后一个任务的完工时间;  $F_{tq}$  表示滚动期  $t$  内岸桥  $q$  最后一个任务的完工时间;  $W_i$ : 表示跨运车等待任务  $i$  由岸桥卸货到达岸桥暂存区的时间;  $W_j$ : 表示岸桥等待任务  $j$  由跨运车运输到达岸桥暂存区的时间。

#### 3) 决策变量。

$x_{ki} \in \{0, 1\}$ : 如果跨运车服务集装箱  $i$ , 值为 1, 否则为 0;  $w_{k_i} \in \{0, 1\}$ : 如果跨运车作业任务  $i$  需要等待, 值为 1, 否则为 0;  $w_{q_i} \in \{0, 1\}$ : 如果岸桥作业任务  $j$  需要等待, 值为 1, 否则为 0;  $y_{kij} \in \{0, 1\}$ : 如果跨运车做完任务  $i$  后做任务  $j$ , 值为 1, 否则为 0;  $y_{qij} \in \{0, 1\}$ , 如果岸桥做完任务  $i$  后做任务  $j$ , 值为 1, 否则为 0。

## 2.2 模型建立

滚动计划目标函数:

$$\min F_{AT}^T \quad (1)$$

约束条件:

$$\max(F_{t-1k}) \leq S_i^k \quad i \in I_p, k \in K \quad (2)$$

$$F_{t-1q} \leq S_i^q \quad i \in I_p, q \in Q \quad (3)$$

$$S_i^k \leq tT \quad (4)$$

$$S_i^q \leq tT \quad (5)$$

$$F_i^k + Tk_{ij} + Tk_j \leq F_{ik} \quad i, j \in I_p \quad (6)$$

$$S_i^q + TQ_i \leq F_{iq} \quad i \in I_p \quad (7)$$

$$M(x_{qi} - 1) \leq S_j^q - (S_i^q + TQ_i) \quad \forall i, j \in I_i^q \quad (8)$$

$$F_i^q \leq F_t \quad \forall i \in I_i^q \quad (9)$$

$$y_{kij}(F_i^k + t_{ij}) \leq S_j^k \quad \forall i, j \in I_i^k \quad (10)$$

$$F_i^q \leq S_i^k + M(1 - J_i) \quad \forall i, j \in I_i^k \quad (11)$$

$$y_{kij} + y_{kji} \leq 1 \quad \forall i, j \in I_i^k \quad (12)$$

$$\forall i \neq j, k \in K \quad (13)$$

$$F_j^k - S_j^q \leq w_j \quad (14)$$

$$F_j^q - S_j^k \leq w_i \quad (15)$$

$$\sum_{q \in Q} x_{qi}, \sum_{k \in K} x_{ki} = 1 \quad \forall i, j \in I \quad (16)$$

$$\sum_{q \in Q} w_{qj}, \sum_{k \in K} w_{ki} = 1 \quad \forall i, j \in I \quad (17)$$

$$\sum_{j, i \neq j} y_{kij} - \sum_{j, i \neq j} y_{kji} = 0 \quad \forall i, j \in I, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{j, i \neq j} y_{qij} - \sum_{j, i \neq j} y_{qji} = 0 \quad \forall i, j \in I, k \in K \quad (19)$$

$$0 \leq S_i^k, S_i^q, F_i^k, F_i^q, F_{tq}, F_{tk}, F_t, \forall i \in I \quad (20)$$

$$0 \leq w_i, w_j, \forall i, j \in I \quad (21)$$

式(1)为目标函数, 表示计划期内所有任务的最小化总完工时间, 其中  $F_{AT}^T$  表示最后一个滚动期完工时间; 式(2) - 式(3)表示每个滚动期内, 跨运车和岸桥

工作的开始时间在上一滚动期最后任务的结束时刻以后;式(4) - 式(5)滚动期内跨运车、岸桥工作的开始时间,不得超过滚动期截止时间,式(6) - 式(7)表示每个滚动期内,跨运车、岸桥结束时间为最后一个任务的结束时刻;任意的岸桥仅负责一个任务,且上一个任务完成后做下一个任务,如式(8)所示; $F_t$ 表示计划期 $t$ 的完工时间,是由该计划期内最后一个任务的完工时间决定的,如式(9)所示;式(10)表示跨运车作业下一个任务的开始时间,是指跨运车在完成任任务 $i$ 后移动到任务 $j$ 位置后开始计算;跨运车作业进口任务的开始时间在岸桥完成该任务以后,如式(11)所示;任意的跨运车仅负责一个任务,如式(12)所示;式(13)确保进出口任务不重复;式(14) - 式(15)分别表示岸桥、跨运车的等待时间;式(16) - 式(19)表示决策变量不重复,不冲突;式(20) - 式(21)表示所有变量为正数。

### 3 模型求解

#### 3.1 滚动计划

滚动计划在码头运作上的应用可以很好地提高码头的灵活性,让码头更加及时高效地处理新增任务和突发情况。滚动计划法将整个任务按计划期时间分成 $n$ 个子任务,每三个子任务为一个滚动期任务,每完成一个子任务滚动一次,更新新一期任务列表,以次类推,最终完成所有任务,具体如图2所示。

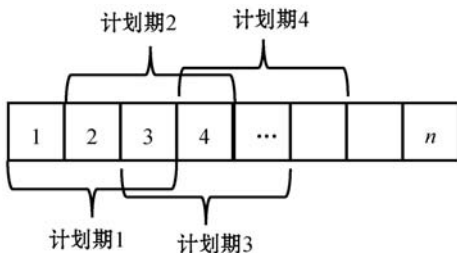


图2 滚动计划法示意图

滚动计划中考虑岸桥和跨运车协同运作,滚动计划开始,初始化任务信息表,包括任务号、类型、起点终点位置等,确定工作时间 $AT$ 和计划期时间 $T$ 。在滚动运作时,每一计划期任务完成后,记录岸桥、跨运车结束时刻信息作为下一个计划期的初始信息,记录未完成任务信息与下一个计划期新增任务重组,作为下一个计划期的任务列表,其中跨运车未完成任务加入下期任务列表求解,岸桥未完成任务安排在下期进口作业之后,出口任务之前完成,过程中记录计划期内已完成任务信息。以此类推滚动至最后一期,完成所有任务后结束滚动,具体流程如图3所示。

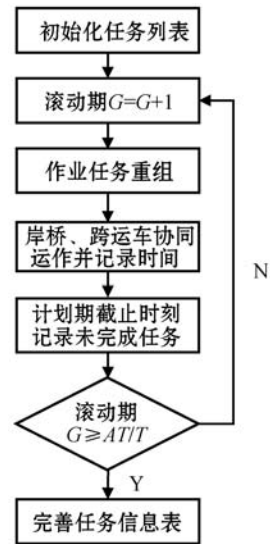


图3 码头滚动计划作业流程

#### 3.2 蚁群算法

选用改进的蚁群算法解决每个计划期内多跨运车作业的任务分配问题。构造解空间时,由于跨运车在每个计划期开始时的初始位置是不同的,所以将跨运车虚拟成一个任务加入编码。单一计划期内,有 $m$ 只蚂蚁,每只蚂蚁迭代 $Itermax$ 次寻找最优路径,在每次迭代结束后,信息素会有一定量的挥发,通过动态调整挥发系数 $\rho$ ,解决传统蚁群算法收敛速度慢、易陷入局部最优解等问题,挥发系数的自适应调整式如下:

$$\rho(t) = \begin{cases} c \times \rho(t-1) & \rho_{\min} \leq c \times \rho(t-1) \\ \rho_{\min} & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\rho$ 信息素挥发系数; $c$ 为随机常数; $\rho_{\min}$ 设置为0.1。蚂蚁按照一定概率选择下一个任务,在任务转移状态规则中加入轮盘赌算法,适应度越大,任务被选中的概率也就越大。该方法提高了解的质量和算法的收敛速度,转移任务概率式如所示:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\mu_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in a_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\mu_{is}(t)]^\beta} \times \frac{f_{ij}}{\sum_{i=1}^q f_{ij}} & j \in a_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $a_k$ 是指蚂蚁未访问的任务集合, $\mu_{ij} = 1/d_{ij}$ 是由距离矩阵得到的启发因子决定的,其次蚂蚁 $k$ 按照轮盘赌选择法产生下个要转移的任务的概率,及 $p_{ij} = f_{ij} / \sum_{i=1}^q f_{ij}$ ,其中: $q$ 为蚂蚁 $k$ 未访问的任务的个数; $f_{ij}$ 则为任务 $i$ 到任务 $j$ 之间的适应度。当每只蚂蚁访问完所有任务后,记录路径,根据跨运车所在的位置做断点,将路径分成 $k$ 段,计算每段的任务跨运车完成时间,选择跨运车最大的完工时间为本计划期的完工时间,将每只蚂蚁的最大完工时间降序排序,选择完工时

间最小的蚂蚁路径设为最优路径,记录本次迭代的最优路径。更新全局信息素矩阵,进入下一次迭代,如更新式如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (24)$$

式中:  $\sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$  是指任务  $i$  到任务  $j$  的信息素增量,  $\tau_{ij}^k(t)$  为第  $k$  只蚂蚁在任务  $i$  到  $j$  上释放的信息素,定义为:

$$\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \varphi \times (QL_\varphi) & \text{边}(i,j)\text{在已访问路径集合中} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

式(4)中  $Q$  为常量,是指蚂蚁在一次完整的路径搜索后释放的信息素总量;  $\varphi = L_{av} - L_\varphi \times L_{av} - L^k$  是指本次迭代的平均长度,  $L_\varphi$  是指较优质蚂蚁  $\varphi$  的路劲长度,  $L^k$  是指蚂蚁  $k$  在本次迭代中的路劲长度。当  $m$  只蚂蚁按规则完成 Itermax 次迭代后,比较每次迭代的最优完工时间,进行较优路径交叉操作,如果当前迭代完工时间大于上次迭代时间,则舍弃当前结果,否则当前结果为最优结果进入下一次迭代,最终选出最小完工时间和对应的跨运车的作业序列为当前计划期的结果。具体流程如图 4 所示。

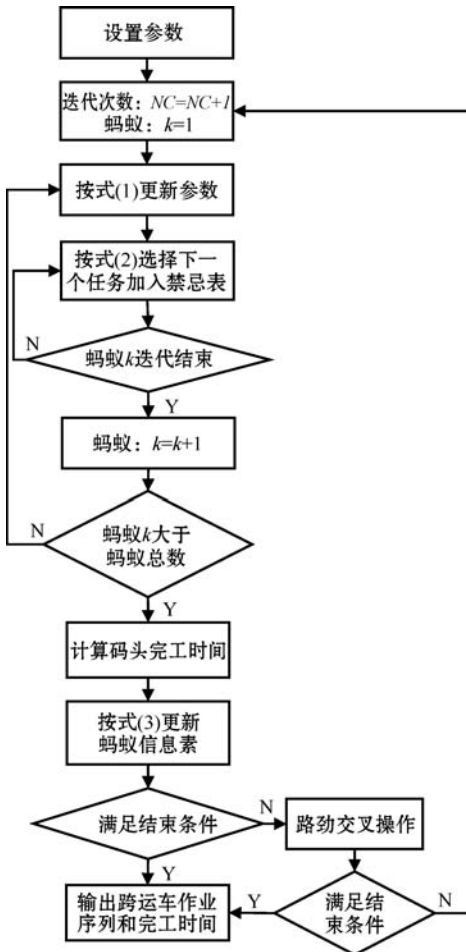


图 4 计划期内蚁群算法求跨运车序列流程

### 4 算例分析

选用 Python 语言在 spyder 开发环境中编写算法,分别用遗传算法(GA)和蚁群算法(ACO)求解模型,对比两种算法在目标结果和运行时间的表现。随机产生若干个集装箱任务,相对应的计划作业时间和集装箱在堆场的位置坐标已知。码头连续工作 160 分钟,每 20 分钟滚动一次,根据计划作业时间,将其划分到相应的滚动期内。岸边有 4 个岸桥同时工作,每个岸桥的任务是随机分配的,为了方便计算,将各个岸桥暂存区坐标简化成为一个坐标,码头有 3 台跨运车同时服务所有的岸桥,本文通过随机安排跨运车在第一个计划期的初始位置来增加实验的随机性,从第二个计划期开始,跨运车的初始位置为上一个计划期内其作业的最后一个任务的终点。

表 1 是 GA 和 ACO 求解的码头最小完工时间和运行时间结果对比如表 1 所示,蚁群算法解出的完工时间优于遗传算法的结果,同时,ACO 运行所耗的时间也较短,蚁群算法的总体表现优异。

表 1 ACO 和 GA 求解结果对比表

任务数量	ACO		GA	
	完工时间 /min	运行时间 /min	完工时间 /min	运行时间 /min
90	89.486 4	4.075 7	91.198 4	4.548 2
126	143.877 3	7.016 2	145.700 3	7.962 6
162	174.890 9	12.695 7	179.744 5	13.378 1
180	195.353 4	17.399 7	203.034 1	19.003 6

图 5 为任务量 180 时,滚动第二期跨运车最大完成时间迭代图,蚁群算法的收敛速度较快,完工时间较早。由此可见,本文包含 mTSP 的 VRPSPD 问题更适合选用蚁群算法来求解。

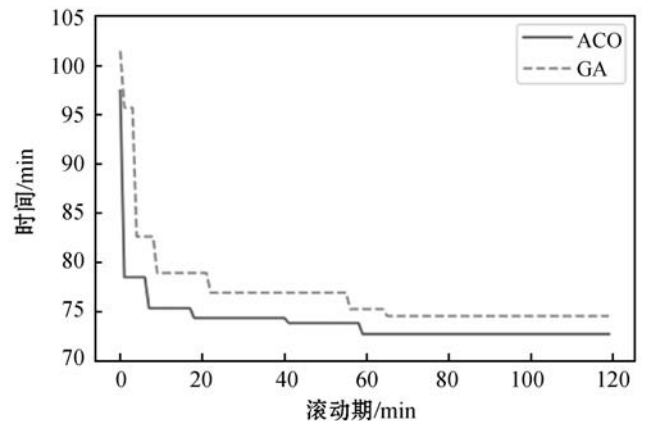


图 5 滚动 2 期算法迭代对比图

设置码头运作 240 分钟完成 180 个任务,每 30 分钟滚动一次,3 台跨运车同时服务 4 台岸桥, $\alpha = 1, \beta = 10$ ,信息素初始值为 8,信息素常量为 5,分别用传统蚁群算法和调整动态挥发系数  $\rho$  的蚁群算法求解模型,实验 10 次取平均值,对目标结果和耗时进行对比,如表 2 所示。

表 2 蚁群算法改进前后对比表

算法	完工时间/min	耗时/min
传统 ACO	121.944 1	18.892 2
改进 ACO	185.353 4	16.480 2

从收敛情况来看,使用挥发系数的自适应公式代替传统挥发常数系数,提高了蚁群算法收敛速度,改善了算法易陷入局部最优解的问题,如图 6 所示。

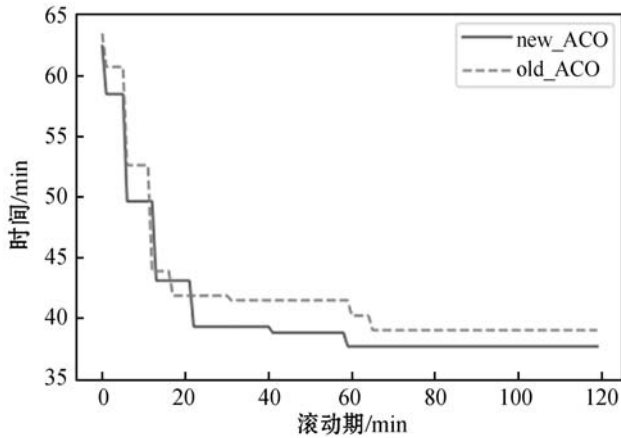


图 6 滚动 1 期蚁群算法改进前后收敛对比图

参数对算法性能有重要的影响,改变参数,经过多次实验得出蚂蚁数量为 15, $\alpha = 0.08, \beta = 14$  时算法效果最佳。图 7 表示第二期码头完工时间的收敛图,横轴表示迭代次数,纵轴表示完工时间。

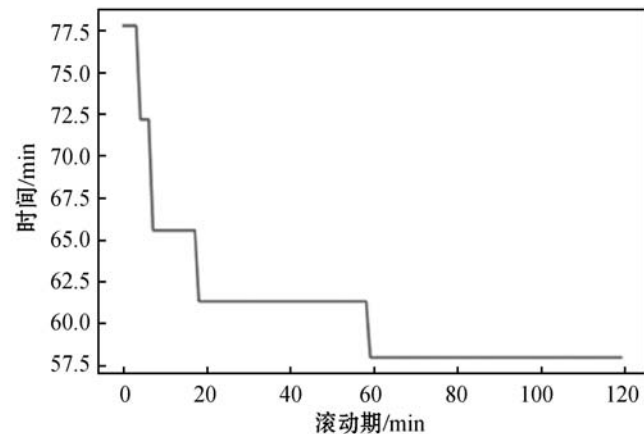


图 7 第二期目标收敛图

表 3 表示每辆跨运车的任务序列,每辆跨运车的任务数量相对平均,体现出算法的对任务安排的设计合理。

表 3 跨运车第三期作业序列

跨运车	任务序列
K1	8 - 12 - 10 - 32 - 27
K2	19 - 18 - 2 - 16 - 7 - 33
K3	25 - 15 - 34 - 1 - 31 - 22

## 5 实验分析

为了进一步分析参数对结果的影响,本文对堆场跨运车数量和计划期时间对码头效率的影响进行讨论,设计两个对比实验,从码头完工时间、跨运车最大完工时间、空驶时间、跨运车、岸桥等待时间、每期任务能力等因素对结果进行分析,其中码头完工时间是指码头岸桥完成最后一个任务的结束时间;跨运车最大完工时间指一组跨运车中最晚完工的那辆跨运车的结束时间;跨运车等待时间是指每台跨运车在码头运营过程中的平均等待时间;岸桥等待时间表示每台岸桥在码头运营过程中的平均等待时间。

实验 1:跨运车灵敏度分析。

码头连续工作 6 个小时,计划期时间为 30 分钟,随机生成 250 个集装箱任务和计划完成时刻,安排数量 2~6 台不等的跨运车组同时服务所有岸桥,经过 6 次实验,结果如图 8 所示。

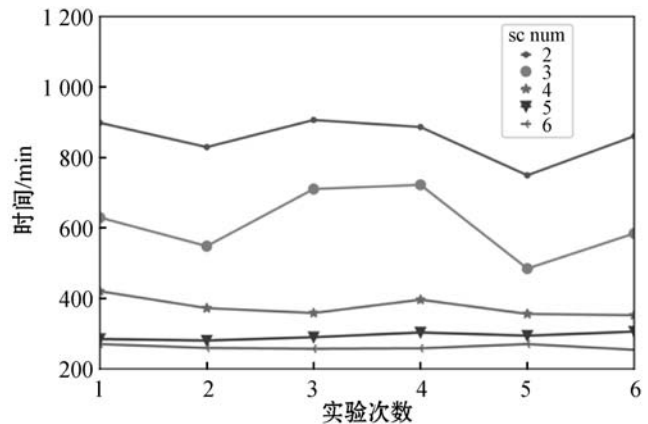


图 8 码头完工时间图

图 8 是实验中的跨运车最大完工时间图,其中横坐标表示实验次数,纵坐标表示跨运车完工时间,图标表示实验中选用不同台数的跨运车在图中对应的颜色。跨运车的数量小于 3 台时,每个跨运车的任务过多,完工时间偏大,同时,跨运车不同的任务分配对结果影响较大;跨运车数量大于 4 台时,完工时间明显降低,任务分配的不同对结果影响不明显;当数量超过 5 台时,完工时间没有明显的变化。

表4表示6次实验中码头的完工时间和工作能力。随着跨运车的数量增加,码头完工时间大幅度减少,当跨运车数量超过5台时,减势平缓;每期完成的任务随着跨运车数量的增加而增加,超过5台时增势平缓。

表4 实验1结果表

跨运车数量	完工时间/min	每期任务能力/min
2	888.493 2	10
3	613.396 2	16
4	401.134 8	24
5	293.240 9	33
6	261.798 5	35

图9表示6次实验中岸桥、跨运车的平均表现。当跨运车数量小于5台时,岸桥的等待时间较长,且随着数量的减少而增加,说明此时服务岸桥任务的跨运车数量达不到需求。而当跨运车数量超过5台时,岸桥等待时间增加,说明此时服务岸桥的跨运车数量大于需求。由于分配任务策略是每个跨运车至少有一个任务,导致岸桥等待时间反而增多;跨运车的等待时间随着数量的增加而减少,当数量超过5台时,减势平缓;跨运车的数量大于4台时,空驶时间没有明显的影响。综上所述,实验结果表明,跨运车为5台时,码头运作表现最佳。

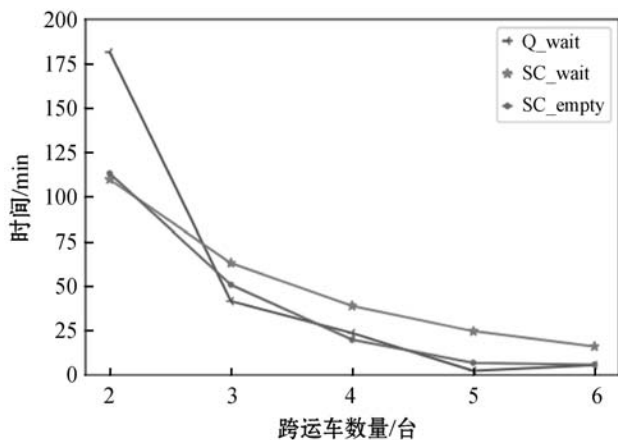


图9 实验1岸桥跨运车信息

实验2:滚动期影响分析。

设置一组600个集装箱任务,码头连续工作6小时,每个时间段都有进出口任务,随机产生新任务,一组4台跨运车服务码头,滚动期设置10~50分钟,每5分钟为一个挡位,从完工时间、岸桥和跨运车等待时间等方面,分析滚动期对码头作业的影响,实验进行5次取平均值,如表5所示。

表5 实验二结果表

滚动期	码头完工 /min	岸桥等待 时间/min	跨运车等待 时间/min	跨运车 空驶/min
20	836.5	2 744.894 3	190.722 7	2 373.465 9
25	720.5	3 081.594 3	392.384 5	1 410.463 6
30	626.5	2 500.173 8	157.935 6	980.681 8
35	724.5	3 796.109 0	148.828 5	627.487 0
40	746.5	3 956.278 4	306.386 9	481.715 9

如图10所示,随着滚动时间增大,码头完工时间、岸桥等待时间和跨运车等待时间逐渐减少,达到最小值后反向增大,少量波动后趋于平缓。起初码头完工时间大幅度减少,在滚动期为30分钟时达到最值626.5,当滚动期大于30分钟后,码头完工时间变大;岸桥等待时间变化与完工时间变化走势相似,于滚动期为30分钟的情况下达到最低。

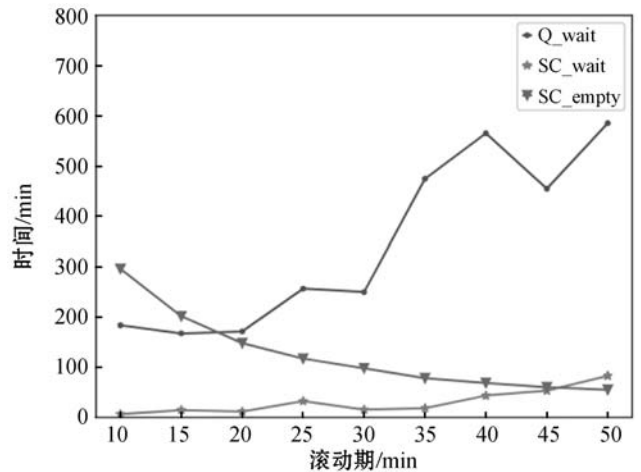


图10 实验2岸桥跨运车信息

如表5所示,跨运车的等待时间于滚动期为35时达到最低,与滚动期为30分钟的结果相差不大;跨运车的空驶时间则随着滚动期时间的增大而减小,综合所得,4台跨运车服务的码头工作6个小时完成600个任务,滚动期时间为30分钟时效果最佳,此时码头滚动12次,每次平均任务为36个。

## 6 结 语

本文研究自动化跨运车码头的任务分配问题,基于滚动计划,考虑码头完工时间最小化和计划期内跨运车最大完工时间最小化,建立模型,旨在改进码头作业效率,提高码头应对突发事件的能力。选用改进的蚁群算法,求解模型,对码头跨运车数量和滚动期时间进行灵敏度分析,得出6个小时不停工作的码头完成250个任务,跨运车为5台时效果最佳;4台跨运车服务的码头工作6个小时完成600个任务,滚动期时间

为 30 分钟时效果最佳。本文得出的结果对于跨运车码头运作有一定的参考价值,接下来的研究可以考虑码头岸桥-跨运车动态调度,开发复杂度更高的调度模型。

## 参 考 文 献

- [1] Wiese J, Suhl L, Kliewer N. An analytical model for designing yard layouts of a straddle carrier based container terminal[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2013, 25(4).
- [2] Cai B H, Huang S D, Dikai Liu D K, et al. Rescheduling policies for large-scale task allocation of autonomous straddle carriers under uncertainty at automated container terminals[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(4): 506 - 514.
- [3] 尧雨琴,胡志华. 基于启发式算法的自动化跨运车作业调度[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(3): 443 - 451.
- [4] Kress D, Meiswinkel S, Pesch E. Straddle carrier routing at seaport container terminals in the presence of short term quay crane buffer areas[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 279(3): 732 - 750.
- [5] 丁一,陈婷. 基于滚动时域优化策略的多载 AGV 充电调度[J]. *中国航海*, 2020, 43(2): 80 - 85.
- [6] 余孟齐,韩晓龙. 有限缓冲空间下岸桥和自动升降车的集成调度[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2016, 38(1): 605 - 609.
- [7] 宓为建,梁泉,张晓华,等. 自动化码头 ALV 实时任务分配[J]. *上海海事大学学报*, 2016, 37(1): 25 - 31.
- [8] 汤鹏飞,梁承姬,丁一,等. 考虑岸桥缓存区的 ALV 调度优化问题研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2015, 40(6): 1540 - 1550.
- [9] 周静娴,胡志华. 自动化集装箱码头 ALV 水平作业任务调度优化[J]. *大连海事大学学报*, 2015, 41(4): 81 - 89.
- [10] 胡蓉,陈文博,钱斌,等. 学习型蚁群算法求解绿色多车场车辆路径问题[J/OL]. *系统仿真学报*: 1 - 14[2020 - 12 - 03]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0349>.
- [11] 胡士娟,鲁海燕,向蕾,等. 求解 MMTSP 的模糊聚类单亲遗传算法[J/OL]. *计算机科学*: 1 - 11[2020 - 01 - 04 13: 52].
- [12] 李雪,王雷. 改进蚁群算法在解决 TSP 问题中的应用[J]. *宜春学院学报*, 2020, 42(03): 63 - 67.
- [13] 张松灿,普杰信,司彦娜,等. 蚁群算法在移动机器人路径规划中的应用综述[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(8): 10 - 19.
- [14] 胡春阳,姜平,周根荣. 改进蚁群算法在 AGV 路径规划中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(8): 270 - 278.
- [15] 李卓,李文霞,巨玉祥,等. 混合蚁群算法求解带软时间窗的车辆路径问题[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2019, 43(4): 761 - 766.
- [16] 王昀睿,仁文哲,葛红玉,等. 基于均衡化的滚动生产计划体系研究[J]. *现代制造工程*, 2019(11): 113 - 116.
- [17] 梁承姬,黄帅. 考虑时间窗的集装箱港口场桥全局调度优化[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(8): 226 - 232.
- [18] 刘娟娟,胡志华. 基于滚动计划的堆场出口箱存储位置分配两阶段模型[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(5): 789 - 800.
- [19] 赵云. “三日滚动作业计划”在港口生产调度管理中的作用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2017, 37(22): 34 - 35.

## (上接第 55 页)

- [16] Chen Y, Zhang Y, Lu H M, et al. Wavelet energy entropy and linear regression classifier for detecting abnormal breasts[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77(3): 3813 - 3832.
- [17] 张昊天. 2196 铝锂合金型材挤压工艺与模具参数优化及微观组织性能研究[D]. 济南:山东大学, 2020.
- [18] 刘佳欣,刘佳宁,陈文琳. 空心铝型材挤压数值模拟与模具结构优化[J]. *模具工业*, 2020, 46(10): 1 - 5, 10.
- [19] Cai T, Ma J, Zhang L J. CHIME: Clustering of high-dimensional Gaussian mixtures with EM algorithm and its optimality[J]. *The Annals of Statistics*, 2019, 47(3): 1234 - 1267.
- [20] Celeux G, Maugis-Rabusseau C, Sedki M. Variable selection in model-based clustering and discriminant analysis with a regularization approach[J]. *Advances in Data Analysis and Classification*, 2019, 13(1): 259 - 278.
- [21] 刘金平,张五霞,唐朝晖,等. 基于模糊粗糙集属性约简与 GMM-LDA 最优聚类簇特征学习的自适应网络入侵检测[J]. *控制与决策*, 2019, 34(2): 243 - 251.
- [22] Hughes D M, Komárek A, Czanner G, et al. Dynamic longitudinal discriminant analysis using multiple longitudinal markers of different types[J]. *Statistical Methods in Medical Research*, 2018, 27(7): 2060 - 2080.
- [23] Yen S W, Morris S, Ezra M, et al. Effect of smart meter data collection frequency in an early detection of shorter-duration voltage anomalies in smart grids[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2019, 109: 1 - 8.
- [24] 李春阳,王先培,田猛,等. AMI 环境下异常用电检测研究[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(8): 66 - 70.
- [25] Wang Y, Chen Q X, Hong T, et al. Review of smart meter data analytics: Applications, methodologies, and challenges[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 3125 - 3148.
- [26] Wan Z T, Li J X, Gao Y. Monitoring and diagnosis process of abnormal consumption on smart power grid[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, 30(1): 21 - 28.