文章编号：1003-1421(2026)04-0162-14
引用格式：崔维华，吴瑞博，庄庆胥，等.考虑装卸顺序的铁路集装箱场站多轨道吊协同调度优化[J].铁道运输与经济，2026，48(4)：162-175.
CUI Weihua，WU Ruibo，ZHUANG Qingxu，et al. Collaborative Scheduling Optimization of Multi-Rail Crane Operations in Railway Container Yards Considering Loading and Unloading Sequences[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：162-175.

考虑装卸顺序的铁路集装箱场站多轨道吊协同调度优化

崔维华[1]，吴瑞博[2]，庄庆胥[3]，王文蕊[4]，李　明[2]

(1.中铁十四局集团物流有限公司，天津　300456；2.山东建筑大学 信息与电气工程学院，山东 济南　250101；3.中铁十四局集团物流有限公司 基建事业部，天津　300456；4.山东建筑大学 交通工程学院，山东 济南　250101)

摘　要：随着铁路集装箱班列开行数量的不断增加，利用高效调度方法来提升铁路集装箱场站的作业组织效率已成为提高铁路集装箱运输服务质量、推动多式联运发展的重要举措。针对铁路集装箱场站多轨道吊协同调度问题，综合考虑了多轨道吊间的空间干涉约束与装卸顺序约束，建立以最小化所有轨道吊完成批次作业的总完工时间为优化目标的数学规划模型。根据多轨道吊协同调度问题的特性与复杂性，采用一种三阶段时空规划方法计算多轨道吊协同作业完工时间，并提出一种融合启发式变异策略的改进遗传算法(GA-HMS)以实现问题的高效求解。数值仿真实验结果表明，与传统遗传算法相比，GA-HMS在优化效果上平均提升了19.22%，在求解此类问题上有显著优势。

关键词：铁路集装箱场站；改进遗传算法；协同作业；调度优化；时空规划方法
中图分类号：U291.5　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20241111001

Collaborative Scheduling Optimization of Multi-Rail Crane Operations in Railway Container Yards Considering Loading and Unloading Sequences

CUI Weihua[1]，WU Ruibo[2]，ZHUANG Qingxu[3]，WANG Wenrui[4]，LI Ming[2]

(1. Logistics Corporation Limited, China Railway 14th Bureau Group, Tianjin 300456, China; 2. The School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 3. Infrastructure Division, Logistics Corporation Limited, China Railway 14th Bureau Group, Tianjin 300456, China; 4. The School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: With the continuous increase in the number of railway container trains, utilizing efficient scheduling methods to optimize the operational organization efficiency of railway container yards has become a crucial measure to improve service quality in railway container transportation and promote the development of intermodal transport. Addressing the issue of multi-rail crane collaborative scheduling in railway container yards, this study comprehensively considered the spatial interference constraints between cranes and the loading/unloading sequence constraints. A mathematical

收稿日期：2024-11-11　　**修订日期**：2025-10-09
通信作者：李明(1978—)，男，山东济南人，山东建筑大学信息与电气工程学院教授。
基金项目：国家自然科学基金项目(62273204)；中铁十四局集团有限公司科研项目(KG91370000163055989120223)

programming model was built to minimize the total completion time of batch operations for all cranes. Based on the characteristics and complexity of the multi-rail crane collaborative scheduling problem, a three-stage spatiotemporal planning method was employed to calculate the collaborative operation completion time. An improved genetic algorithm (GA-HMS) incorporating a heuristic mutation strategy was proposed to achieve efficient problem-solving. The numerical simulation results show that compared to traditional genetic algorithms, GA-HMS improves the optimization effect by an average of 19.22%, demonstrating a significant advantage in solving such problems.
Keywords: Railway Container Yard; Improved Genetic Algorithm; Collaborative Operation; Scheduling Optimization; Spatiotemporal Planning Method

0　引言

在国家大力推进多式联运政策背景下，集装箱作为便携高效的标准化货运载体，已在我国铁路货运领域得到广泛应用[1]。铁路集装箱场站是集装箱多式联运的重要节点，其精准调度和高效装卸作业尤为重要[2-3]。通过装卸设备调度优化提高集装箱场站的作业组织效率，是提升铁路集装箱运输服务质量、促进多式联运发展的重要途径[4]。

近年来，国内外学者对集装箱场站装卸设备调度优化的研究主要集中于多台轨道式龙门起重机(以下简称“轨道吊”)的协同调度问题，通常以缩短批次作业的完工时间作为核心优化目标进行研究。依据研究对象协同作业模式的差异，可将现有研究归纳为固定分区协同模式、柔性分区协同模式、接力区协同模式以及集装箱卡车(以下简称“集卡”)协同模式4种类型。固定分区协同模式是指为每台轨道吊划分固定的作业范围，轨道吊在各自的作业范围内独立进行集装箱装卸作业的一种作业模式。对于固定分区协作模式，Boysen 等[5-6]通过作业区域划分，将调度问题转化为任务分配问题，构建区域划分问题整数规划模型，采用动态规划法进行求解；Wang 等[7]建立卸车序列问题模型，应用蚁群优化算法进行求解；Otto 等[8]将调度问题分成2步解决，首先通过动态规划算法进行作业区域划分，决策轨道吊的任务分配，将多轨道吊协同调度转换成单个轨道吊的任务排序问题，再使用启发式或精确算法对各轨道吊的任务排序问题进行求解，确定作业的最佳顺序。柔性分区协同模式是指允许轨道吊的作业范围根据作业需求和现场情况灵活调整，通过调度策略保证轨道吊之间的安全作业距离，避免多台轨道吊相互交叉穿越的一种作业模式。在柔性分区协同模式的相关研究中，Guo 等[9]考虑轨道吊间安全距离、交叉及空载距离等约束，建立混合整数规划模型，设计改进人工蜂群算法求解；周勇等[10]提出一种解决多个轨道吊之间作业冲突的任务分配策略和干涉判断方法，并构建混合整数规划模型，采用改进麻雀搜索算法进行求解。接力区协同作业模式是指通过在堆场中划定特定的贝位作为接力区，使得多台轨道吊不但可以在各自负责的区域进行装卸作业，也可以通过接力区进行接力作业的一种作业模式。针对接力区协同作业模式，Guo 等[11]针对2台轨道吊在接力协同作业模式下的调度问题，提出了多种启发式调度规则，并通过对比实验给出了各种调度规则的使用场景；刘凤辉等[12]提出了2台轨道吊在接力区干涉情况的判断方法以及接力区动态调整规则，构建了混合整数规划模型，采用遗传算法和蚁群算法融合的算法进行求解。集卡协同作业模式是指使用集卡辅助轨道吊进行装卸作业，代替轨道吊进行长距离搬运的一种作业模式。以集卡协同作业模式为研究对象，Li 等[13]在完工时间的基础上，综合考虑了集装箱场站的能耗和集卡空载时间，建立整数规划模型，设计基于CFHI和模糊相关熵的多目标人工蜂群算法进行求解；赵睿年[14]将轨道吊作业均衡率引入到目标函数中，构建双层装卸设备调度模型，采用双层遗传算法进行求解；王小寒等[15]考虑了轨道吊作业的均衡性，构建了最大的双层装卸设备调度模型，并设计了结合启发式算法、协同进化算法和遗传算法的双层HCEGA求解模型进行求解；常祎妹等[16]考虑集装箱场站集卡“一车两箱”因素，构建了整数规划模型，并采用遗传模拟退火算法进行求解。孙逊等[17]针对双高箱办理站不设主作业区、“完全间接装卸”、装卸作业多流向及出站箱同步转运的特点，以最小化完成装卸作业用时、装卸线轨道吊等待时间最小化和作业均衡率最大化为优化目标，构建轨道吊、AGV、

空箱堆垛机和智能举升机间的协同调度模型，并设计遗传算法和模拟退火算法混合算法进行求解。

以上研究仅关注轨道吊间的空间干涉约束，而未考虑装卸作业顺序约束，即同一箱位上位于下层的任务箱提箱作业开始时刻必在上层任务箱提箱作业完成时刻之后，位于上层的任务箱落箱作业开始时刻必在下层任务箱落箱作业完成时刻之后。以最小化所有轨道吊完成作业的总完工时间为优化目标，建立包含空间干涉约束与装卸顺序约束的数学规划模型，提出一种基于启发式变异策略的遗传算法 (Genetic Algorithms based on Heuristic Mutation Strategies，GA-HMS)对模型进行求解，通过数值仿真实验验证了该算法的有效性。

1　问题描述

集装箱场站内的堆场区域是集装箱存储与转运的主要场所，集装箱堆场的布局图如图 1 所示。

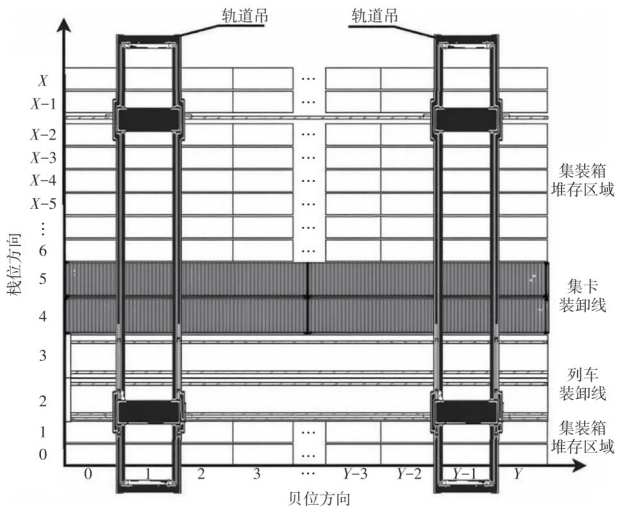

图 1　集装箱堆场的布局图

Fig.1　Layout of a container yard

堆场区域由集装箱堆存区域、集卡装卸线、列车装卸线和轨道吊组成。当集装箱列车或集卡到达场站时，由轨道吊按照预先制定的作业计划进行集装箱装卸作业。轨道吊的运行机构分为大车和小车 2 部分，大车负责起重机在轨道上移动，以覆盖不同的作业区域，小车负责吊具沿起重机横梁移动，负责将吊具定位至集装箱或货位上方进行装卸作业。多轨道吊协同作业调度问题可以描述为：假设一个待作业批次中有 N 个装卸集装箱列车或集卡的任务，且每个任务起始和结束位置已知，如何将 N 个任务分配给多台轨道吊同时作业，并合理规划每台设备的作业顺序，尽可能缩短批次任务的完成时间。轨道吊之间应时刻保持安全距离，在作业过程中，若相邻 2 台轨道吊之间的距离不满足安全作业的要求，则必须有一台轨道吊停止作业或主动避让[18]。

2　模型建立

2.1　假设条件及变量说明

为简化问题设置如下假设。

（1）忽略人为和自然因素的影响。

（2）任务的起点与终点位置已知。

（3）集装箱箱型一致，均为 20 ft 标准集装箱。

（4）轨道吊的行驶速度、提箱和卸箱操作时间都为固定参数。

（5）不考虑集装箱需要翻箱的情况。

（6）所有集装箱列车和集卡均已到达场站等待装卸作业。

模型参数及说明如表 1 所示，变量及说明如表 2 所示。

表 1　参数及说明

Tab.1　Parameters and descriptions

符号	说明
n，N	装卸任务集装箱总数、集合
k，K	参与装卸作业的轨道吊总数、集合
X	堆场区域的总栈位数
Y	堆场区域的总贝位数
Z	堆场区域的总层位数
M	一个充分大的正数，取 10^8
P^{o}	轨道吊取箱操作时间，s
P^{d}	轨道吊放箱操作时间，s
x_i^{o}	任务 i 的起点位置的栈位
y_i^{o}	任务 i 的起点位置的贝位
z_i^{o}	任务 i 的起点位置的层位
x_i^{d}	任务 i 的终点位置的栈位
y_i^{d}	任务 i 的终点位置的贝位
z_i^{d}	任务 i 的终点位置的层位
$L_{i,\,k}^{\mathrm{b}}$	设备 k 执行任务 i 沿堆场贝位方向的移动距离，m
$L_{i,\,k}^{\mathrm{s}}$	设备 k 执行任务 i 沿堆场栈位方向的移动距离，m
$L_{ij,\,k}^{\mathrm{b}}$	设备 k 从任务 i 的终点到任务 j 的起点沿堆场贝位方向的移动距离，m
$L_{ij,\,k}^{\mathrm{s}}$	设备 k 从任务 i 的终点到任务 j 的起点沿堆场栈位方向的移动距离，m
v^{b}	轨道吊大车的平均移动速度，m/s
v^{s}	轨道吊小车的平均移动速度，m/s

表2　变量及说明

Tab.2　Variables and descriptions

符号	说明
$u_{ij,\ k}$	0-1变量，若将编号为i，j的任务分配给设备k且设备k完成编号为i的任务后进行任务j则为1，否则为0。此外，当任务i，j为同一任务时为0
$g_{xyz,\ t}$	0-1变量，若在t时刻，箱位x，y，z上存有集装箱则为1，否则为0
T_{ik}^{o}	连续变量，设备k执行任务i提取集装箱的时刻
T_{ik}^{d}	连续变量，设备k执行任务i落箱集装箱的时刻
S_{kt}	整数变量，t时刻设备k在堆场贝位方向上所处的位置

2.2　模型构建

模型的求解目标为所有轨道吊完成作业的总完工时间最小，目标函数如式(1)所示。

$$\min f = \min\{\max(T_{ik}^{\mathrm{d}})\} \tag{1}$$

模型约束条件如下。

（1）作业时间约束。

$$T_{ik}^{\mathrm{d}} - T_{jk}^{\mathrm{o}} + \max\left(\frac{L_{ij,\ k}^{\mathrm{b}}}{v^{\mathrm{b}}},\ \frac{L_{ij,\ k}^{\mathrm{s}}}{v^{\mathrm{s}}}\right) + P^{\mathrm{o}} \leqslant M(1 - u_{ij,\ k}) \quad i \in N;\ j \in N;\ k \in R \tag{2}$$

$$T_{ik}^{\mathrm{d}} \geqslant T_{ik}^{\mathrm{o}} + \max\left(\frac{L_{i,\ k}^{\mathrm{b}}}{v^{\mathrm{b}}},\ \frac{L_{i,\ k}^{\mathrm{s}}}{v^{\mathrm{s}}}\right) + P^{\mathrm{d}} \quad i \in N;\ j \in N;\ k \in R \tag{3}$$

式(2)表示单台轨道吊后序任务提箱时刻与当前任务落箱时刻的时间关系；式(3)表示轨道吊当前任务提箱时刻与落箱时刻的时间关系。

（2）设备能力及作业序列约束。

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} u_{ij,\ k} \leqslant 1 \quad i = 1,\ 2,\ \cdots,\ N \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{N} u_{ij,\ k} \leqslant 1 \quad i \in N;\ k \in R \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{N} u_{ij,\ k} \leqslant 1 \quad j \in N;\ k \in R \tag{6}$$

式(4)表示每个任务至多分配给一台轨道吊；式(5)表示每个任务至多有一个紧后任务；式(6)表示每个任务至多有一个紧前任务。

（3）集装箱装卸顺序约束。

$$(T_{ik}^{\mathrm{o}} - T_{jl}^{\mathrm{o}})(z_j^{\mathrm{o}} - z_i^{\mathrm{o}}) \geqslant 0 \quad k \neq l,\ x_i^{\mathrm{o}} = x_j^{\mathrm{o}};\ y_i^{\mathrm{o}} = y_j^{\mathrm{o}};\ i \in N;\ j \in N;\ k \in R;\ l \in R \tag{7}$$

$$(T_{ik}^{\mathrm{d}} - T_{jl}^{\mathrm{d}})(z_j^{\mathrm{o}} - z_i^{\mathrm{o}}) \leqslant 0 \quad k \neq l,\ x_i^{\mathrm{d}} = x_j^{\mathrm{d}};\ y_i^{\mathrm{d}} = y_j^{\mathrm{d}};\ i \in N;\ j \in N;\ k \in R;\ l \in R \tag{8}$$

式(7)表示同一箱位上的下层集装箱的提箱时刻要晚于上层集装箱的提箱时刻；式(8)表示同一箱位上的下层集装箱的落箱时刻要早于上层集装箱的落箱时刻。

（4）轨道吊安全距离约束。

$$|S_{kt} - S_{lt}| \geqslant h \quad k \neq l;\ 0 \leqslant t \leqslant \max(T_{ik}^{\mathrm{d}});\ k \in R;\ l \in R \tag{9}$$

式(9)表示轨道吊之间应时刻保持一定的安全距离。

3　GA-HMS算法设计

多轨道吊协同调度优化问题是一个NP-Hard问题，作业任务分配与作业序列优化具有很强的关联性，每一个任务分配方案都对应着多种不同的可行作业序列，受时序约束、设备间空间干涉和区域限制的影响，作业序列变化导致的连锁反应对批次任务完工时间具有显著影响[19]。因此，在遗传算法(genetic algorithm，GA)基础上，设计三阶段时空规划适应度计算方法解决染色体适应度计算和可行性判断问题，引入精英保留操作、同步顺序交叉操作、启发式变异操作提高适应度收敛速度和稳定性。GA-HMS算法流程图如图2所示。

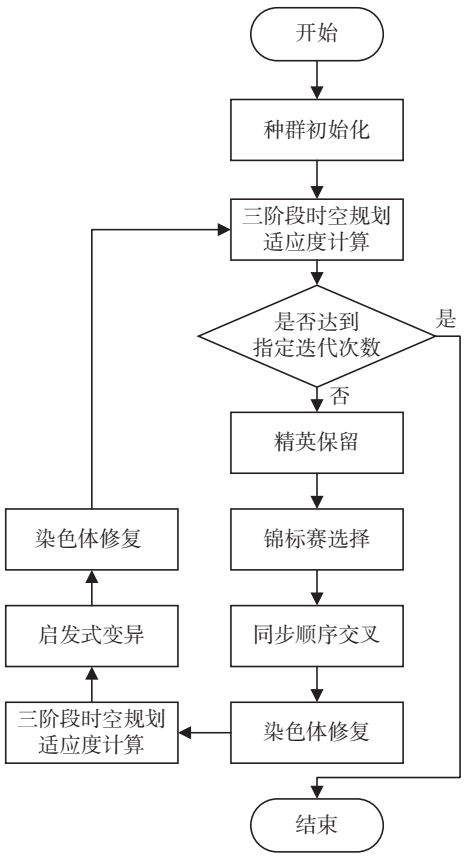

图2　GA-HMS算法流程图

Fig.2　Flowchart of GA-HMS

3.1　编码设计

在涉及多台装卸设备的调度问题中，作业任务分配与作业序列优化具有强关联性，因此在染色体编码设计中采用双段基因表达。染色体前半段基因为作业序列基因，用于表达作业序列方案；染色体后半段基因为任务分配基因，用于表达任务分配方案。染色体编码示意图如图3所示，前段基因单个编码为任务序号，后段基因单个编码为作业设备类型，2段基因段相同序号代表设备执行任务。在编码示例中，任务1，2分配轨道吊0执行，任务序列为2，1；任务3，4，5分配轨道吊1执行，任务序列为4，3，5。



图3　染色体编码示意图

Fig.3　Chromosome coding diagram

3.2　染色体修复策略

在任务分配方案和作业序列确定后，对单台轨道吊的装卸顺序执行可行性检查，提前识别并修正因单台轨道吊装卸顺序不当导致的不可行解，提升算法效率。染色体修复方法如下。在所有提箱任务中分别检索所有位置下层任务箱作业排序和对应上层任务箱作业排序，若下层任务箱作业排序在前，则交换上下层任务箱作业次序。同理，落箱任务中则交换上层任务箱作业排序在前的上下层任务箱作业次序。

3.3　三阶段时空规划适应度计算方法

在遗传算法生成具体的任务分配和作业顺序方案后，可以通过时空状态推演计算方案的适应度。由于多台轨道吊不能出现空间上的交叉作业，必须保持一定的安全距离，且堆场的堆存状态受到多台轨道吊的影响，轨道吊的到达顺序与装卸顺序需保持一致，否则会使部分轨道吊无法按照既定的作业顺序完成自身的作业。鉴于此，研究提出三阶段时空规划适应度计算方法。第1阶段，不考虑多台轨道吊在空间上的交叉作业，根据各设备的任务序列和效率参数分别计算设备的时空推进过程，得到松弛条件下的设备时空状态表；第2阶段，在松弛条件下的设备时空状态表的基础上检查交叉作业，并对交叉作业进行调整，直到所有交叉作业全部消除，得到无交叉作业的设备时空状态表；第3阶段，根据无交叉作业的时空状态表对堆场状态进行推演，对轨道吊的作业过程进行验证，若各设备按照给定的作业顺序可以完成作业，则返回适应度数值为批次任务的完工时间，否则返回一个足够大的数值，代表该方案为不可行解。三阶段时空规划方法流程图如图4所示。

第1阶段，暂不考虑多台轨道吊在空间上交叉干涉，通过时空状态推演生成松弛设备调度表。轨道吊单个任务作业时间构成图如图5所示，根据操

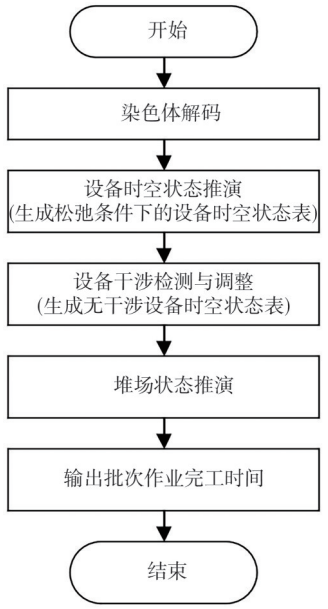

图4　三阶段时空规划方法流程图

Fig.4　Flowchart of three-stage spatiotemporal planning



图5　轨道吊单个任务作业时间构成图

Fig.5　Temporal composition of single crane operation

作的类型，可以将时间划分为贝位方向移动时间、栈位方向移动时间、提箱操作时间和落箱操作时间。其中，贝位方向移动时间是指轨道吊大车沿轨道移动的时间，即沿堆场贝位方向移动的时间；栈位方向移动时间是指轨道吊小车沿起重机横梁移动的时间，即沿堆场栈位方向移动的时间；轨道吊在进行作业时大车与小车通常共同移动，因此贝位方向移动时间与栈位方向移动时间有重叠的部分。提箱操作时间主要包括吊具下降、集装箱对位、吊具锁定及吊具上升4个阶段所耗时间；同样，落箱操作时间也由吊具下降、集装箱对位、吊具解锁和吊具上升4个阶段的时间构成。

在设备时空状态推演的过程中，只需要对关键事件发生的地点和时间进行记录。多台轨道吊在空间上的交叉干涉仅发生在贝位方向上，因此装卸设备操作过程中是否涉及贝位方向上的移动十分关键。基于以上考虑，将装卸设备的作业时间分为贝间移动时间和贝内作业时间，关键作业时间的记录应包括任务开始时刻、贝间移动结束时刻和任务结束时刻。关键作业位置的记录应包括作业开始贝位、作业开始栈位、作业目标贝位和作业目标栈位。小型算例如表3所示，得出的松弛条件下的设备时空状态表如表4所示。

第2阶段，根据松弛条件下的设备调度表，对多台轨道吊在空间上交叉干涉进行调整。作业干涉情况可分为2种。第1种干涉情况为行进设备与作业设备之间的干涉，即当一台轨道吊在进行贝间行进的过程中，遭遇另外一台正处于贝内作业状态的轨道吊，若按照既定作业路径继续行进，设备间的安全距离将无法保证时，就会发生干涉。为了保证二者之间的安全距离，行进设备必须原地等待，当作业设备完成作业时，行进设备才能继续行进或根据实际情况执行避让操作。第1种作业干涉调整示意图如图6所示。第2种干涉情况为行进设备之间的干涉，即当相邻2台轨道吊均处于贝间行进的过程中，若双方继续按原路径行进则安全距离将无法满足时，就会发生干涉。第2种作业干涉调整示意图如图7所示。轨道吊之间的避让遵从空载让重载的原则，当发生干涉的2种设备均处于空载或重载的相同状态时，则距离目的地近的设备优先作业。

设备间作业干涉调整方法流程图如图8所示。

第3阶段，依据无干涉设备时空状态表以及箱位堆存状态表，通过逐步推演堆场状态验证装卸顺序约束是否能够满足，若约束得以满足则将对应个

表3　小型算例

Tab.3　Small-scale example

任务号	提箱位置	落箱位置	分配设备
1	(21，6，1)	(21，5，0)	轨道吊0
2	(26，7，1)	(26，5，0)	轨道吊0
3	(35，6，1)	(35，5，0)	轨道吊0
4	(23，8，1)	(23，5，0)	轨道吊1
5	(31，8，0)	(31，5，0)	轨道吊1
6	(38，7，0)	(38，5，0)	轨道吊1

表4　松弛条件下的设备时空状态表

Tab.4　Spatiotemporal state of equipment under relaxed conditions

编号	设备类型	作业类型	开始贝位坐标	开始栈位坐标	目标贝位坐标	目标栈位坐标	任务开始时间/s	贝间移动结束时间/s	任务结束时间/s
0	轨道吊0	提箱	50	21	139.75	24.25	0	53.839	113.839
0	轨道吊0	落箱	139.75	24.25	139.75	21	113.839	113.839	166.006
1	轨道吊0	提箱	139.75	21	172.25	26.75	166.006	185.502	245.502
1	轨道吊0	落箱	172.25	26.75	172.25	21	245.502	245.502	299.335
2	轨道吊0	提箱	172.25	21	230.75	24.25	299.335	334.428	394.428
2	轨道吊0	落箱	230.75	24.25	230.75	21	394.428	394.428	446.595
−1	轨道吊0	复位	230.75	21	50	21	446.595	555.023	555.023
3	轨道吊1	提箱	350	21	152.75	29.25	0	118.326	178.326
3	轨道吊1	落箱	152.75	29.25	152.75	21	178.326	178.326	233.826
4	轨道吊1	提箱	152.75	21	204.75	29.25	233.826	265.020	325.020
4	轨道吊1	落箱	204.75	29.25	204.75	21	325.020	325.020	380.520
5	轨道吊1	提箱	204.75	21	250.25	26.75	380.520	407.815	467.815
5	轨道吊1	落箱	250.25	26.75	250.25	21	467.815	467.815	521.648
−1	轨道吊1	复位	250.25	21	350	21	521.648	581.486	581.486

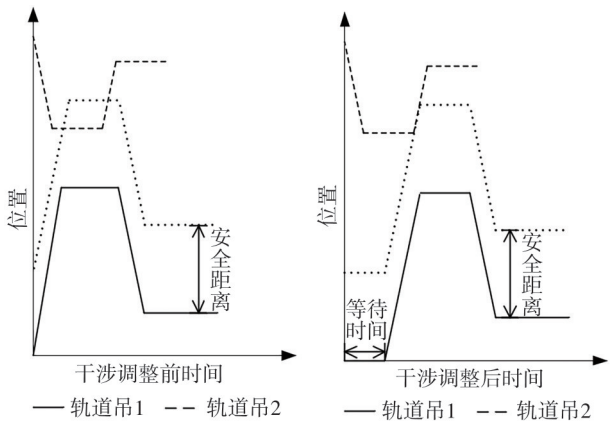

图6　第1种作业干涉调整示意图

Fig.6　Adjustment for work interference (Type 1)

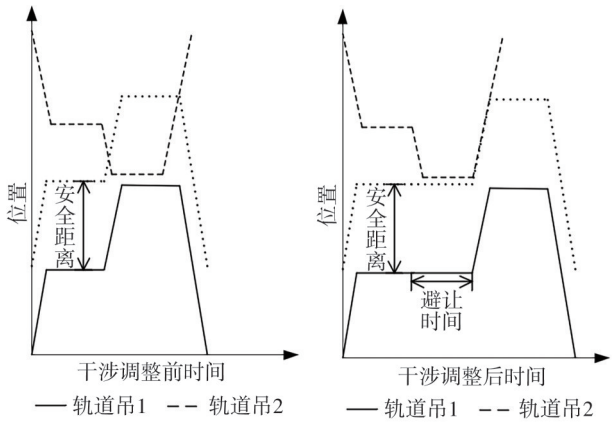

图7　第2种作业干涉调整示意图

Fig.7　Adjustment for work interference (Type 2)

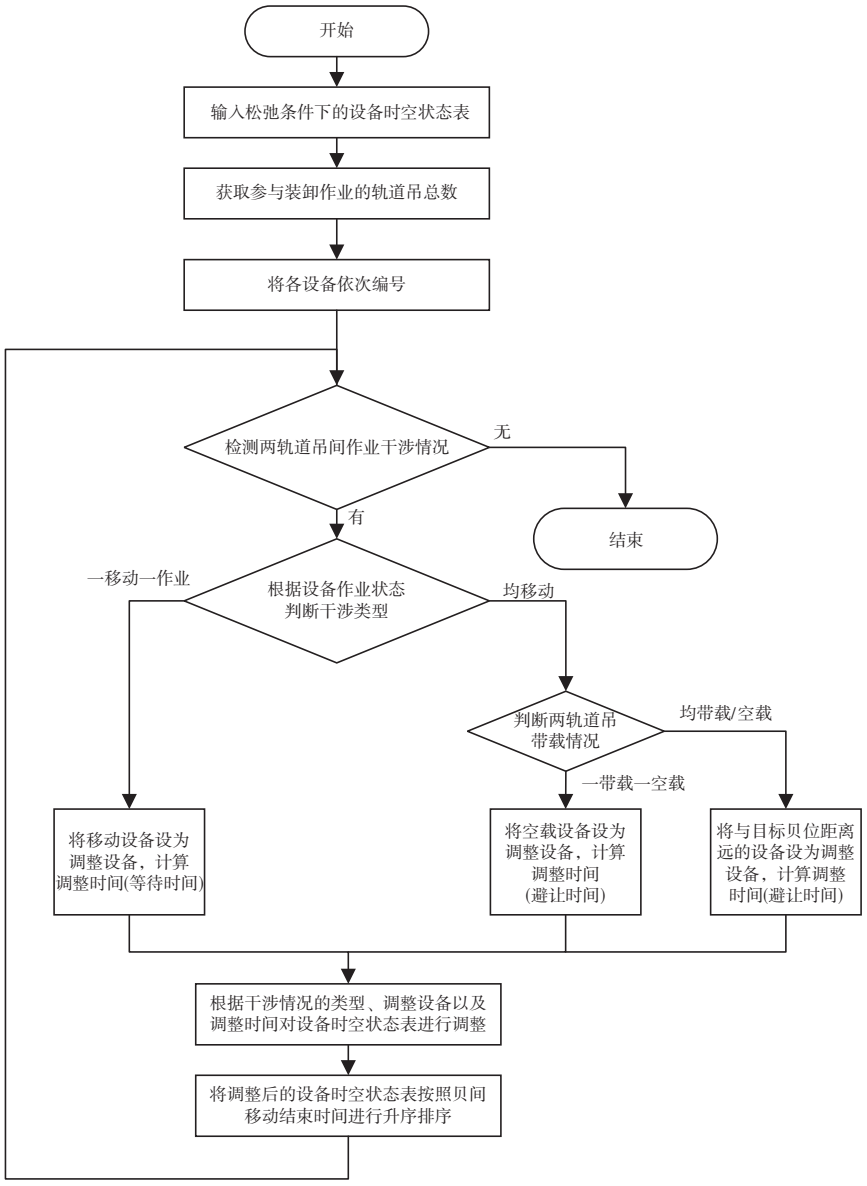

图8　设备间作业干涉调整方法流程图

Fig.8　Flowchart of equipment operation interference adjustment methods

体的适应度赋值为所有轨道吊完成作业的总完工时间，否则将对应个体的适应度赋值为一个足够大的值，即标注该调度方案为不可行解。堆场状态推演方法流程图如图9所示。

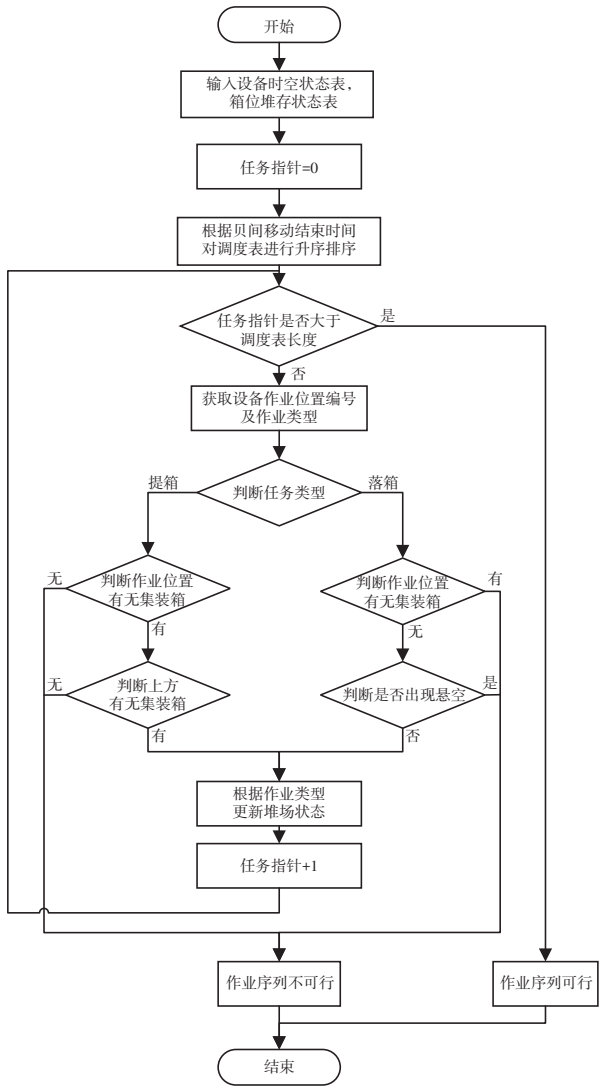

图9　堆场状态推演方法流程图

Fig.9　Flowchart of yard status deduction method

3.4　精英保留策略

为了避免在遗传过程中可能出现的优良基因流失问题，在二元锦标赛选择算子的基础上，引入精英保留策略，将当前适应度最优的部分个体不经过交叉变异操作直接复制到新种群中，防止种群中的最优个体在进化过程中丢失[20]。

3.5　同步顺序交叉策略

基于种群个体的双段编码模式，设计一种基于作业顺序与任务分配的同步顺序交叉算子，同步顺序交叉操作示意图如图10所示，具体流程如下。对于染色体的作业顺序层，从选定的父代个体中任意选择1个个体，将随机选定的2个交叉点之间的基因段复制到子代染色体上，并记录索引位置。将另一父代个体中与子代染色体重复的基因删除，将剩余基因依次复制到子代个体染色体的空缺位置，并记录索引位置。最后根据索引位置，对染色体作业分配层执行上述操作，得到子代染色体。

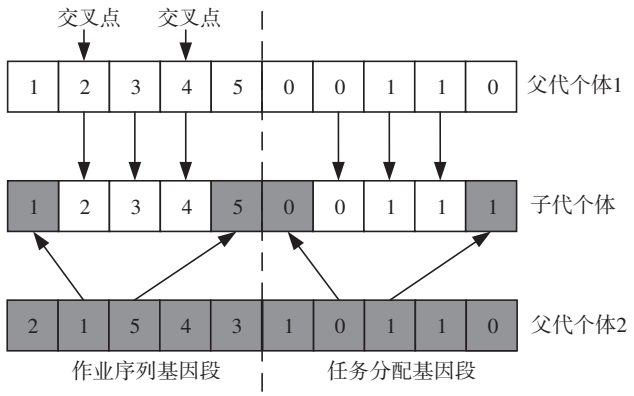

图10　同步顺序交叉操作示意图

Fig.10　Synchronized sequential cross-operation

3.6　启发式变异策略

提出一种启发式变异策略，具体分为2个阶段。

第1阶段，在余弦改进型[21]自适应变异概率的计算方法的基础上，引入了对不可行解的处理方式。根据种群平均适应度及个体解码后方案的可行性将种群中个体分为优质个体、劣质个体和不可行个体，进化过程中依据个体的适应度表现，动态地调整其变异概率，变异概率的计算如式(10)所示。采用限定于染色体的作业序列基因段的两点交换变异方式，交换位置的选择采用随机策略，当2个被选中的任务属于同一装卸设备时，该操作实现了对装卸设备的作业序列的扰动。若2个任务不属于同一装卸设备，该操作实现了装卸设备任务分配方案的改变。两点变异操作示意图如图11所示。

$$P_m=\begin{cases}\dfrac{P_{\max}+P_{\min}}{2}+\dfrac{P_{\max}-P_{\min}}{2}\cos\left(\dfrac{f_{\text{avg}}-f_m}{f_{\text{avg}}-f_{\max}}\pi\right) & f_m\leqslant f_{\text{avg}}\\ P_{\max} & f_{\text{avg}}<f_m<100\,000\,000\\ 1 & f_m>100\,000\,000\end{cases}\tag{10}$$

第2阶段，对种群中适应度较差的劣质个体实施引导性变异。对于每个劣质个体，计算该个体对应

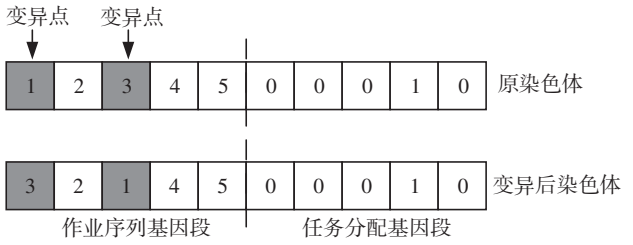

图11　两点变异操作示意图

Fig.11　Two-point mutation operation

的调度方案中所有任务的避让时间，选择其中避让时间最长的任务作为关键任务，并对关键任务的作业位次进行分离调整，从而避免产生长时间的设备避让作业。算法步骤如下。

（1）适应度评估。对种群中的个体进行适应度评估，选出种群中适应度在后N%的个体，其中N为种群引导比例，是可变参数。

（2）等待时间计算。对选中的个体进行解码，使用三阶段时空规划适应度计算方法对轨道吊的空间干涉进行调整，通过松弛条件下的设备时空状态表计算任务的各必要作业时间，再通过无干涉设备时空状态表计算调整后各任务的实际作业时间，将实际作业时间与必要作业时间相减获得每个任务的避让和等待时间的总和。

（3）关键任务识别与重排。按照避让时间与等待时间之和对所有任务进行降序排序，将避让时间与等待时间之和最大的任务定义为关键任务，尝试将其调整到任务序列的首端或尾端，得出备选方案，关键任务识别与重排操作示意图如图12所示。

（4）适应度再评估。对调整后的序列进行再次适应度评估，验证位置调整是否有效提高了个体的适应度。

（5）方案比较与选择。将调整后的调度方案与原始方案进行比较，选择最优方案进行编码产生新个体，替换种群中的原有个体。

4　实验设计与结果分析

以某国际陆港集装箱场站为背景，依据场站历史运行数据设计多组算例进行实验。某国际陆港集装箱场站堆场采用图1所示布局。堆场尺寸为66贝、14栈、2层，其中设有10排集装箱箱位(0，1，6—13栈)，箱位长度为6.5 m，箱位宽度为2.5 m；2条尽头式列车装卸线(2—3栈)，2条集卡装卸通道(4—5栈)。设备参数如下。轨道吊大车空载平均移动速度为100 m/min，重载平均移动速度为80 m/min，轨道吊小车平均移动速度为90 m/min，轨道吊提箱操作的时间为60 s，落箱操作的时间为50 s。设备之间的安全距离设为30 m。基于Intel(R) Core(TM) i5-12400F CPU@ 2.50 GHz、16 GB内存的Windows 11系统上进行实验分析。

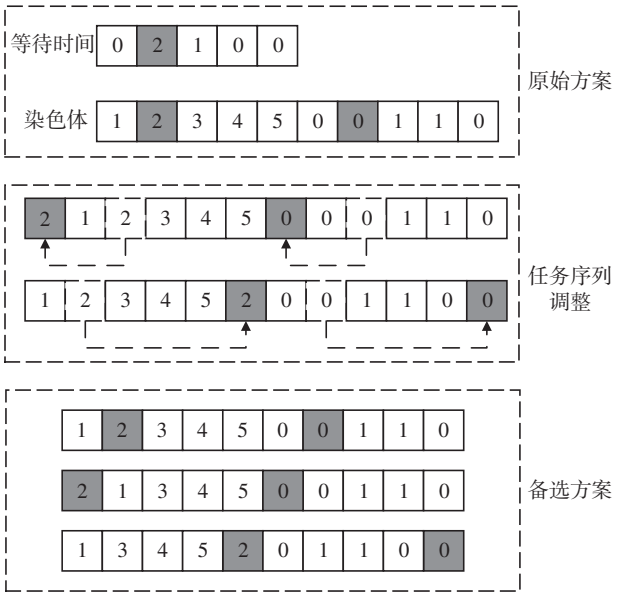

图12　关键任务识别与重排操作示意图

Fig.12　Critical task identification and rescheduling operation

4.1　典型算例分析

典型算例任务表如表5所示，算例中包含20项作业任务，作业类型有装载列车、装载集卡和卸载集卡3种，每项任务都有明确的提箱位置和落箱位置。集装箱堆场初始堆存状态如图13所示，通过

表5　典型算例任务表

Tab.5　Typical example tasks

任务号	提箱位置	落箱位置	任务号	提箱位置	落箱位置
0	(20，1，1)	(24，3，0)	10	(29，9，0)	(26，3，0)
1	(19，6，0)	(22，3，0)	11	(26，7，0)	(29，3，0)
2	(19，6，1)	(19，3，0)	12	(26，8，1)	(26，5，0)
3	(21，6，1)	(20，3，0)	13	(31，8，0)	(31，5，0)
4	(23，8，1)	(23，3，0)	14	(35，1，1)	(35，5，0)
5	(21，6，0)	(21，3，0)	15	(21，6，1)	(21，5，0)
6	(25，10，0)	(25，3，0)	16	(20，5，0)	(20，6，0)
7	(26，7，1)	(30，3，0)	17	(35，5，0)	(35，7，0)
8	(27，1，1)	(27，3，0)	18	(39，5，0)	(39，6，0)
9	(28，8，0)	(28，3，0)	19	(43，5，0)	(43，0，0)

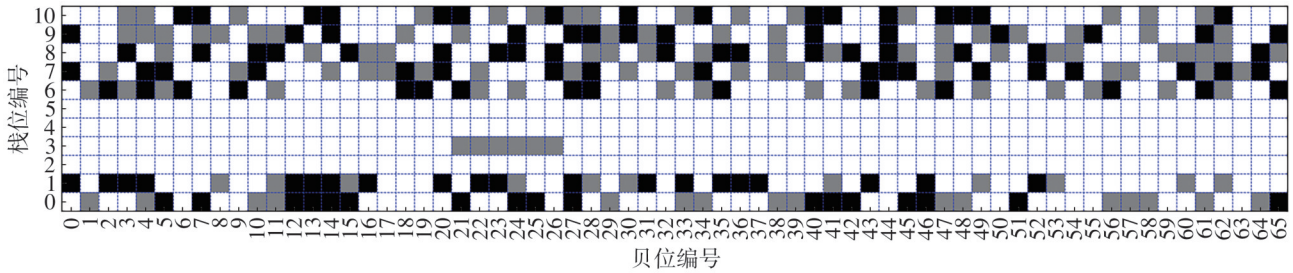

图13　集装箱堆场初始堆存状态

Fig.13　Initial stacking status of container yard

不同灰度的矩形来表示集装箱的堆叠数量，其中，浅色矩形代表箱位上集装箱数量为1，深色矩形代表箱位上集装箱数量为2。

设置改进遗传算法种群大小为20，精英个体选择比例为0.1，选择概率为0.9，交叉概率为0.6，最大变异概率为0.2，最小变异概率为0.01，启发式引导个体比例为0.15。算法最大迭代次数为100代，经过运算后得到的最优个体迭代曲线如图14所示。

由图14可见，最优个体的适应度从2 566.75逐步下降至1 608.2。在迭代过程中，适应度曲线呈现阶梯式下降，表明算法可以有效跳出局部最优，具备较好的全局搜索能力。最优解中设备无干涉调度表如表6所示，轨道吊0分配10项任务，任务序列为2，3，5，15，0，6，4，1，8，17，完成最后一项任务的时间为1 419.55 s；轨道吊1分配10项任务，任务序列为7，10，11，9，18，13，12，14，19，16，完成最后一项任务的时间为1 608.20 s。

将表6中的设备时空状态转化为设备时空状态图，最优解中设备时空状态如图15所示。轨道吊

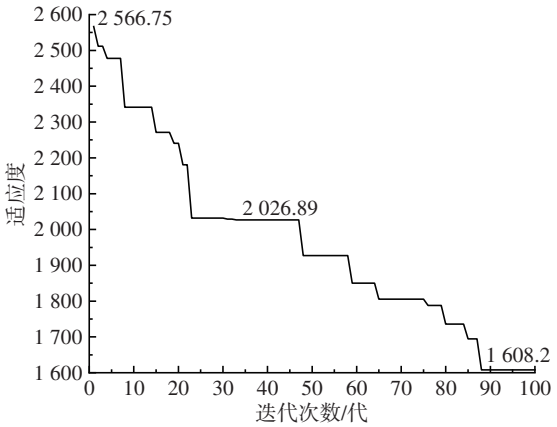

图14　最优个体迭代曲线

Fig.14　Optimal individual iteration curve

表6　最优解中设备无干涉调度表

Tab.6　Interference-free device scheduling in optimal solution

编号	设备名称	作业类型	开始贝位坐标	开始栈位坐标	目标贝位坐标	目标栈位坐标	任务开始时间/s	贝间移动结束时间/s	任务结束时间/s
2	轨道吊1	提箱	50	21	126.75	24.25	0.00	46.04	106.04
2	轨道吊1	落箱	126.75	24.25	126.75	12.50	106.04	106.04	163.87
3	轨道吊1	提箱	126.75	12.50	139.75	24.25	163.87	171.67	231.71
3	轨道吊1	落箱	139.75	24.25	133.25	12.50	231.71	236.58	289.54
5	轨道吊1	提箱	133.25	12.50	139.75	24.25	289.54	293.44	357.37
5	轨道吊1	落箱	139.75	24.25	139.75	12.50	357.37	357.37	415.21
15	轨道吊1	提箱	139.75	12.50	139.75	24.25	415.21	415.21	483.04
15	轨道吊1	落箱	139.75	24.25	139.75	21	483.04	483.04	535.21
0	轨道吊1	提箱	139.75	21	133.25	3.75	535.21	539.11	606.71
0	轨道吊1	落箱	155.25	3.75	159.25	12.50	640.06	643.06	693.06
6	轨道吊1	提箱	159.25	12.50	165.75	34.25	693.06	696.96	767.56
6	轨道吊1	落箱	165.75	34.25	165.75	12.50	767.56	767.56	832.06
4	轨道吊1	提箱	165.75	12.50	152.75	29.25	832.06	839.86	903.23
4	轨道吊1	落箱	152.75	29.25	152.75	12.50	903.23	903.23	964.39
1	轨道吊1	提箱	152.75	12.50	126.75	24.25	964.39	979.99	1 039.99
1	轨道吊1	落箱	142.25	24.25	146.25	12.50	1 086.19	1 089.19	1 139.19

续表

编号	设备名称	作业类型	开始贝位坐标	开始栈位坐标	目标贝位坐标	目标栈位坐标	任务开始时间/s	贝间移动结束时间/s	任务结束时间/s
8	轨道吊1	提箱	146.25	12.50	178.75	3.75	1 139.19	1 158.69	1 218.69
8	轨道吊1	落箱	178.75	3.75	178.75	12.50	1 218.69	1 218.69	1 274.52
17	轨道吊1	提箱	178.75	12.50	230.75	21	1 274.52	1 305.72	1 365.72
17	轨道吊1	落箱	230.75	21	230.75	26.75	1 365.72	1 365.72	1 419.55
−1	轨道吊1	复位	230.75	26.75	50	0	1 419.55	1 527.97	1 527.97
7	轨道吊2	提箱	350	21	172.25	26.75	0.00	106.63	166.63
7	轨道吊2	落箱	172.25	26.75	198.25	12.50	166.63	186.13	236.13
10	轨道吊2	提箱	198.25	12.50	191.75	31.75	236.13	240.03	308.97
10	轨道吊2	落箱	191.75	31.75	172.25	12.50	308.97	323.60	373.60
11	轨道吊2	提箱	172.25	12.50	172.25	26.75	373.60	373.60	443.10
11	轨道吊2	落箱	172.25	26.75	191.75	12.50	443.10	457.73	507.73
9	轨道吊2	提箱	191.75	12.50	185.25	29.25	507.73	511.62	578.89
9	轨道吊2	落箱	185.25	29.25	185.25	12.50	578.89	578.89	640.06
18	轨道吊2	提箱	185.25	12.50	256.75	21	640.06	682.95	742.95
18	轨道吊2	落箱	256.75	21	256.75	24.25	742.95	742.95	795.12
13	轨道吊2	提箱	256.75	24.25	204.75	29.25	795.12	826.31	886.31
13	轨道吊2	落箱	204.75	29.25	204.75	21	886.31	886.31	941.81
12	轨道吊2	提箱	182.75	21	172.25	29.25	964.39	970.69	1 030.69
12	轨道吊2	落箱	172.25	29.25	172.25	21	1 030.69	1 030.69	1 086.19
14	轨道吊2	提箱	172.25	21	230.75	3.75	1 086.19	1 121.29	1 181.29
14	轨道吊2	落箱	230.75	3.75	230.75	21	1 181.29	1 181.29	1 242.79
19	轨道吊2	提箱	230.75	21	282.75	21	1 242.79	1 273.98	1 333.98
19	轨道吊2	落箱	282.75	21	282.75	1.25	1 333.98	1 333.98	1 397.15
16	轨道吊2	提箱	260.75	1.25	133.25	21	1419.55	1 496.03	1 556.03
16	轨道吊2	落箱	133.25	21	133.25	24.25	1 556.03	1 556.03	1 608.20
−1	轨道吊2	复位	133.25	24.25	350	0	1 608.20	1 738.22	1 738.22

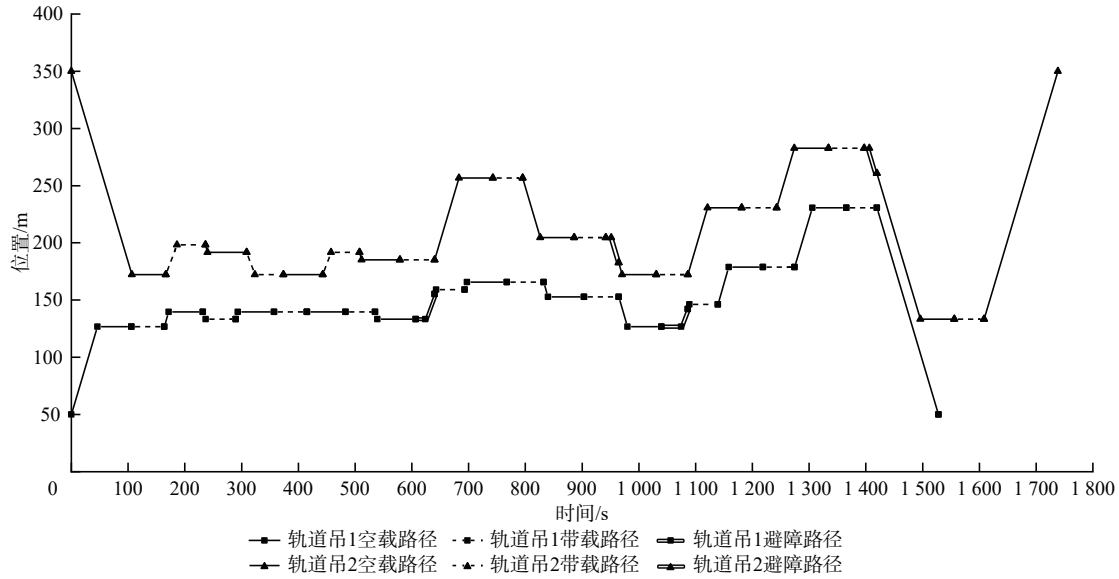

图15　最优解中设备时空状态

Fig.15　Space-time state of device in optimal solution

在作业过程中大多数时间保持连续作业，仅出现了少量的等待和避让。

4.2　算法性能分析

首先对GA-HMS中的种群引导比例的取值进行实验，除种群引导比例之外，算法参数沿用4.1节中的设置，每组实验运行3次取均值。算法效果随种群引导比例变化趋势图如图16所示，随着种群引导比例的逐步提高，最佳适应度呈现先下降后上升的趋势。综合实验结果，种群引导比例选择为0.2，此时算法的搜索效果达到最佳。

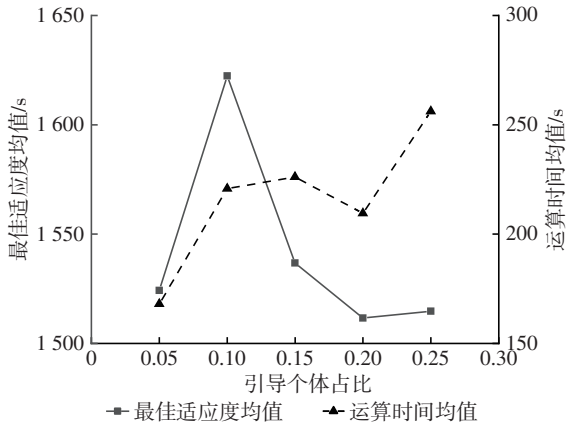

图16　算法效果随种群引导比例变化趋势图

Fig.16　Trend graph of algorithm performance with respect to population guidance proportion

将GA-HMS与GA进行对比。GA采用与GA-HMS相同的编码规则，交叉率为0.6，变异率为0.1。在不同规模的任务实验中，2种算法均进行100次迭代，不同规模实验下算法性能对比如表7所示。从表7中数据可以看出，不同规模下GA-HMS求解的批次任务完工时间均小于GA。算法性能对比(任务数为30)如图17所示，可以看出，GA在探索前期就陷入了局部最优，算法容易早熟。而引入改进的算法机制后，算法的探索能力增强，具有更好的性能。

表7　不同规模实验下算法性能对比

Tab.7　Comparison of algorithm performance under different scale experiments

任务数	批次任务完工时间均值			运算时间均值/s	
	GA/s	GA-HMS/s	GA-HMS较GA的优化率/%	GA	GA-HMS
15	1 534.48	1 088.75	29.05	126.27	233.70
20	2 019.99	1 563.03	22.62	261.92	585.71
25	2 224.17	1 974.24	11.24	506.68	690.92
30	2 592.68	2 230.89	13.95	591.49	641.72

注：每组实验运行3次取均值。

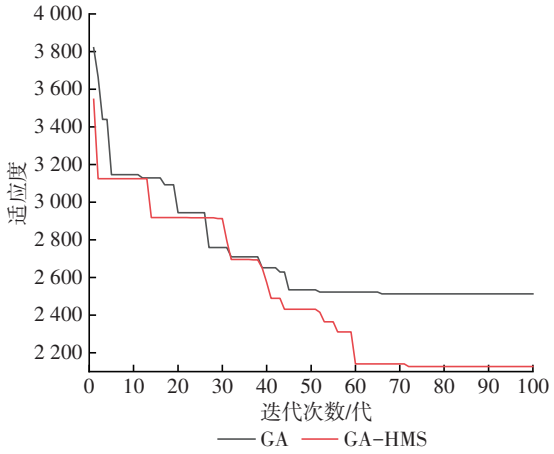

图17　算法性能对比(任务数为30)

Fig.17　Algorithm performance comparison (number of tasks is 30)

5　结束语

针对集装箱场站多台轨道吊在协同作业过程中的任务分配与作业序列联合优化问题，以批次任务完工时间最小为目标，建立混合整数规划模型，并设计GA-HMS求解该问题。在GA-HMS中，为了解决通过染色体解码得来的任务分配和作业序列方案难以直接计算批次任务完工时间的问题，设计三阶段时空规划方法计算染色体的适应度，在GA基础上引入精英保留策略、同步顺序交叉算子、启发式变异策略加速适应度收敛速度，提高稳定性。实验分析表明，相较于GA，GA-HMS的优化效果平均提升19.22%。考虑到装卸设备的作业效率并不是唯一衡量作业质量的指标，经济效益对集装箱场站的实际运营同样重要，接下来的研究将深入探索完工时间与作业成本之间的动态平衡关系，通过构建多目标优化模型并设计高效求解算法，为铁路集装箱场站的运营决策提供兼顾效率与效益的优化方案。

参考文献：

[1] 韩聪颖，曲思源，尹　峰，等. 合肥地区铁路货运站集装箱作业效率提升策略研究[J]. 铁道货运，2024，42(6)：13-18.

HAN Congying，QU Siyuan，YIN Feng，et al. Research on

Improving Efficiency of Container Operations at Railway Freight Stations: A Case Study of Hefei Area[J]. Railway Freight Transport, 2024, 42(6): 13-18.

[2] 师志鸿，李友东，王瑞永，等. 基于鲁棒软时间窗和箱种代用的铁路集装箱空箱调运优化[J]. 铁道运输与经济，2024，46(5)：22-30.
SHI Zhihong, LI Youdong, WANG Ruiyong, et al. Optimization of Railway Empty Container Allocation Based on Robust Soft Time Window and Container Type Substitution[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(5): 22-30.

[3] 赵　华. 铁路集装箱门吊数字化改造及自动化作业研究[J]. 铁路物流，2025，43(8)：20-25.
ZHAO Hua. Research on Digital Transformation and Automated Operations of Railway Container Gantry Cranes[J]. Railway Logistics, 2025, 43(8): 20-25.

[4] 吴华稳. 面向“一带一路”的多式联运发展研究综述[J]. 铁路物流，2025，43(7)：48-53.
WU Huawen. Research Review on Multimodal Transport Development in Context of “Belt and Road Initiative”[J]. Railway Logistics, 2025, 43(7): 48-53.

[5] BOYSEN N, FLIEDNER M, KELLNER M. Determining Fixed Crane Areas in Rail-Rail Transshipment Yards[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(6): 1005-1016.

[6] BOYSEN N, EMDE S, FLIEDNER M. Determining Crane Areas for Balancing Workload among Interfering and Noninterfering Cranes[J]. Naval Research Logistics(NRL), 2012, 59(8): 656-662.

[7] 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(1): 682486.

[8] OTTO A, LI X Y, PESCH E. Two-Way Bounded Dynamic Programming Approach for Operations Planning in Transshipment Yards[J]. Transportation Science, 2016, 51(1): 325-342.

[9] 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.

[10] 周　勇，张　杰，钟祯充，等. 铁路集装箱中心站多轨道吊柔性协同调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息，2022，22(1)：133-141.
ZHOU Yong, ZHANG Jie, ZHONG Lingchong, et al. Flexible Cooperative Scheduling Optimization of Multiple Rail Mounted Gantry Cranes in Railway Container Terminals[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 133-141.

[11] GUO P, WANG L M, XUE C, et al. Dispatching Rules for Scheduling Twin Automated Gantry Cranes in an Automated Railroad Container Terminal[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(3): 2205-2217.

[12] 刘凤辉，张纪会. 铁路场站“轨道吊-共有贝位”调度优化研究[J/OL]. 复杂系统与复杂性科学，2024：1-9. (2024-03-12). https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1402.N.20240311.1657.002.html.
LIU Fenghui, ZHANG Jihui. Scheduling Optimization of Railway Container Terminals with “Rail Crane-Common Bay”[J/OL]. Complex Systems and Complexity Science, 2024: 1-9. (2024-03-12). https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1402.N.20240311.1657.002.html.

[13] LI W F, DU S S, ZHONG L C, et al. Multi-Objective Scheduling for Cooperative Operation of Multiple Gantry Cranes in Railway Area of Container Terminal[J]. IEEE Access, 2022, 10: 46772-46781.

[14] 赵睿年. 考虑同步转运作业的铁路集装箱中心站装卸设备调度优化[D]. 成都：西南交通大学，2021：33-54.

[15] 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]. 计算机集成制造系统，2022，28(1)：217-229.
WANG Xiaohan, LIAN Kaige, ZHANG Haiping, et al. Dynamic Gantry Crane Allocation and Integrated Scheduling with Truck in Railway Container Terminal[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(1): 217-229.

[16] 常祎妹，汪　洋，朱晓宁. 基于运载能力的铁路集装箱中心站轨道吊与集卡协同优化[J]. 交通运输系统工程与信息，2024，24(1)：188-198.
CHANG Yimei, WANG Yang, ZHU Xiaoning. Collaborative Optimization of Rail Mounted Gantry Crane and Container Truck Based on Actual Transportation Capacity in Railway Container Terminals[J]. Journal of Transportation Systems Engineering

and Information Technology，2024，24(1)：188-198.

[17] 孙　逊，张　辉，蒋惠园，等. 双高箱办理站装卸设备协同调度研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(9)：95-106.
SUN Xun，ZHANG Hui，JIANG Huiyuan，et al. Collaborative Scheduling of Handling Equipment at Double-Layer High Cube Container Freight Station[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(9)：95-106.

[18] 张　岩，李博宇，周升健，等. 铁路货运场站作业安全冲突防护方法研究[J]. 铁路物流，2025，43(6)：45-51.
ZHANG Yan，LI Boyu，ZHOU Shengjian，et al. Safety Conflict Protection Method for Railway Freight Yard Operation[J]. Railway Logistics，2025，43(6)：45-51.

[19] 杨小明，徐子奇，张梦天，等. 穿越式自动化轨道吊任务分配与作业序列联合优化[J]. 计算机集成制造系统，2020，26(11)：3094-3107.
YANG Xiaoming，XU Ziqi，ZHANG Mengtian，et al. Integrated Optimization for Task Assignment and Sequence Decision of Cross-Over Twin Automated Rail Mounted Gantries[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems，2020，26(11)：3094-3107.

[20] 汪开普，章　卫，李新宇. 基于遗传模拟退火算法的资源受限人机协作装配线平衡研究[J]. 计算机集成制造系统，2025，31(6)：2043-2058.
WANG Kaipu，ZHANG Wei，LI Xinyu. Genetic Simulated Annealing Algorithm for Resource-Constrained Human-Robot Collaborative Assembly Line Balancing Problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems，2025，31(6)：2043-2058.

[21] 石　山，励庆孚，王兴华. 基于自适应遗传算法的无刷直流电机的优化设计[J]. 西安交通大学学报，2002，36(12)：1215-1218.
SHI Shan，LI Qingfu，WANG Xinghua. Design Optimization of Brushless Direct Current Motor Based on Adaptive Genetic Algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2002，36(12)：1215-1218.

(责任编辑　魏　然)

(上接第136页)

[13] 张鹏羽，李正中，张翕然，等. 不同时期下城市轨道交通客流的时空影响机制研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2025，25(4)：24-33.
ZHANG Pengyu，LI Zhengzhong，ZHANG Xiran，et al. Spatiotemporal Impact Mechanism of Urban Rail Transit Passenger Flow in Different Periods[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2025，25(4)：24-33.

[14] 杨　芳，张自尧，黄倩倩，等. 甘肃省农产品物流运输的影响因素分析：基于灰色关联和聚类分析[J]. 物流科技，2024，47(13)：66-70.
YANG Fang，ZHANG Ziyao，HUANG Qianqian，et al. Analysis of the Influencing Factors of Agricultural Logistics Transportation in Gansu Province：Based on Grey Correlation and Cluster Analysis[J]. Logistics Sci-Tech，2024，47(13)：66-70.

[15] 罗　莹，黄玮青，伍　峰，等. 基于聚类分析的公路货运价格与运输距离之间关系研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(7)：132-142，150.
LUO Ying，HUANG Weiqing，WU Feng，et al. Relationship between Highway Freight Rate and Transportation Distance Based on Cluster Analysis[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(7)：132-142，150.

[16] 熊　纯，李海鹰，庞子恒，等. 基于轴辐式网络的高铁快运通达性研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(1)：120-129.
XIONG Chun，LI Haiying，PANG Ziheng，et al. Research on Accessibility of High Speed Rail Express Based on Hub-and-Spoke Network[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：120-129.

[17] 沈运帷，高哲康，林顺富，等. 面向小样本数据的居民用户用电行为刻画及其需求响应潜力评估[J]. 电网技术，2025，49(5)：2057-2066.
SHEN Yunwei，GAO Zhekang，LIN Shunfu，et al. Portrait of Residential Customers' Electricity Consumption Behavior and Its Assessment on Demand Response Potential Based on Small-Sample Data[J]. Power System Technology，2025，49(5)：2057-2066.

[18] CHEN W H，TIAN Z. Interpolation-Based K-means Clustering Improvement for Sparse，High Dimensional Data [C]// Oxford United Kingdom. ACM，2019：11-15.

(责任编辑　汪沁萱)