



混堆模式下多箱区场桥联合调度*

郑红星, 吴 岳, 杨文滔, 徐静静

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为了在提升港方整体服务水平的同时降低运营成本, 对固定时段内堆场混堆模式下多箱区的场桥调度问题进行了研究。以场桥移动、转场成本与内外集卡等待成本之和最小为目标, 重点考虑场桥在箱区间的合理共享、场桥作业量的均衡、场桥与集卡的有效衔接 3 个方面, 建立了混堆模式下多箱区场桥联合调度的非线性数学规划模型。基于问题特点设计了基于场桥作业序列和作业量的两部分染色体编码方式, 利用嵌入解空间切割策略和染色体修复技术的改进遗传算法进行求解。算例试验分析结果表明, 应用该模型和算法得出的调度方案效果良好, 从而验证了它们的可行性和有效性。

关键词: 多箱区场桥调度; 混堆模式; 作业量均衡; 改进遗传算法

中图分类号: U 693

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0113-07

Yard cranes joint scheduling in multiple blocks under mixed storage mode

ZHENG Hong-xing, WU Yue, YANG Wen-tao, XU Jing-jing

(Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to improve the service level of port authority and reduce the operational cost at the same time, we probe into the yard cranes scheduling problem in multiple blocks in a fixed period under mixed storage mode. Considering YCs resource sharing among the blocks and the workload balance of YCs and their relationship with the internal and external trucks, we propose a non-linear mathematical model of yard cranes joint scheduling in mixed storage yard for the objective of minimizing the total cost of yard cranes' moving, turning cost and the waiting cost of the trucks involved. A two-part chromosome representation is presented based on the handling sequence and workload of YCs, then an IGA with the embedding of the available space split strategy and chromosome correction technology is proposed to solve the problem. The results from the empirical analysis seem quite well, which proves the feasibility and validity of the model and IGA.

Keywords: yard cranes scheduling in multiple blocks; mixed storage mode; workload balance; improved genetic algorithm

集装箱堆场是集装箱变装的缓冲区, 一方面通过内集卡的衔接影响船舶作业时间, 另一方面通过外集卡提送箱关联货主满意度, 因此提高堆场的作业效率是港方提升服务水平、增强竞争力的重要保障。

影响堆场作业效率的因素主要有 3 个: 堆场布局、堆存策略和场桥调度。其中, 堆场布局属于港方长期规划内容, 短期变动很小; 优化的堆存策略和合理的场桥调度, 是当前堆场研究的焦点。为了提高堆场利用率, 混堆模式的堆存策略被多数港口

采纳, 针对混堆模式进行的研究中, 李建忠^[1]利用两阶段模型研究混堆箱区箱位分配问题, 首先平衡各箱区进出口箱量, 然后以集卡运输距离最短为目标将每艘船的进出口箱分配到箱区内具体贝位; 郑红星^[2]引入新增压箱数的概念进行了混堆模式下进场箱的箱位指派建模。场桥作为堆场中的瓶颈设备备受学者关注, 王展^[3]研究了堆场单箱区混贝条件下的场桥调度问题, 设计了改进的禁忌搜索算法进行求解; 郑红星^[4]利用混合遗传算法对混堆单箱区

收稿日期: 2014-07-11

*基金项目: 国家自然科学基金 (71371037), 港群绿色增长模式和协同创新策略研究 (71473024)

作者简介: 郑红星 (1971—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为物流系统仿真与优化。

内的多台场桥进行调度研究；Guo^[5]以集卡等待时间最小为目标建立了单场桥动态调度的混合整数规划模型；赵磊^[6]以场桥作业量均衡为目标建立了场桥调度模型；Amir^[7]在单箱区内进行了场桥精确调度的研究；Cheng^[8]对于多箱区的场桥调度提出多目标0-1规划模型并设计了混合遗传算法进行求解；He^[9]考虑了场桥的转场对多箱区内的场桥调度进行了深入研究。

综上所述，现有混堆模式研究偏重于堆存优化；针对场桥调度问题侧重于单箱区内调度，少数学者对于多箱区的场桥调度研究多以任务组为单位，没有细化到具体任务，也缺乏考虑场桥与内外集卡之间的衔接；由于多数港口中场桥司机根据其操作总作业量获取计件工资，因此场桥作业量均衡对于堆场的员工激励体系非常重要，而这一点多数研究未涉猎。考虑到上述不足与堆场的实际情况，本文研究多箱区内多场桥调度优化问题，在场桥可转场的前提下建立了场桥调度模型，同时考虑场桥移动成本与集卡等待成本，设计了求解问题的改进遗传算法，其中利用解空间切割策略能有效保证场桥作业量均衡，采用任务互换的染色体修复技术将出现场桥跨越的不可行染色体变为可行解。

1 问题描述

随着我国对营运车辆管理的日益规范，未来抵港作业的外集卡必须安装 GPS 系统，因此各大港口的信息平台在提供集卡预约服务的同时，还可通过与交通部门的及时沟通掌握预约外集卡的实时信息。大连港借助 DPN 平台提供集卡预约服务，另外还为协议车队车辆免费安装 GPS 系统，并且同附近高速公路管理部门联网，已经能够获取固定时段内预约外集卡的准确抵港时间与取送箱信息；混堆模式下场桥服务对象既包括内集卡也包括外集卡，作业结果则体现在相关集卡带来堆场的进出场箱流（图 1）；实际堆场计划中会按照航线、目的港和箱型等属性将整个堆场划分为多个区域，每个区域包含多个箱区，所以研究多箱区内场桥联合调度更具现实意义。混堆模式下多箱区内的场桥调度是指：在预约得知计划期内堆场的总任务量及相关集卡到达时间之后，考虑场桥在箱区间的资源共享、场桥作业量的均衡、内外集卡作业优先级等因素，进行场桥在多箱区内的调度优化，得出每个场桥的作业量及其作业序列，以达到完成所有任务过程中场桥的移动、转场成本与内外集卡等待成本之和最小化的目标。

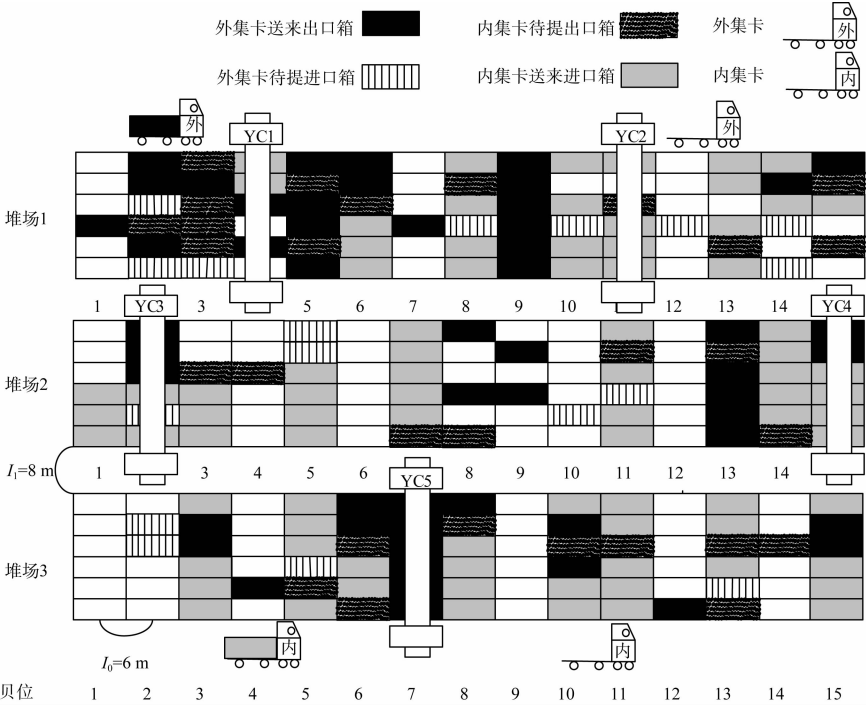


图 1 混堆堆场作业示意

2 场桥多箱区联合调度模型

2.1 模型假设

1) 混堆堆场多箱区布局见图1, 每个箱区贝位数相同, 且都从左向右递增。

2) 计划期内到达堆场各箱区的任务量已知, 且每个任务位置、装卸时间、对应集卡到达时间已知。

3) 堆场可用场桥资源已知, 每个箱区最多同时配备3台场桥。

4) 考虑内外集卡作业优先级。

2.2 参数说明

N : 计划期内作业总数; Q : 计划期内待作业箱区个数; B : 各箱区的总贝位数; M : 计划期内堆场可用的场桥数; N_m : 场桥 m 作业总数; n_{gap} : 场桥作业的不均衡底线; K_{im} : 场桥 m 第 i 个任务对应的任务编号; Q_{im} : 场桥 m 第 i 个任务所在箱区, $Q_{im} \in Q$; B_{im} : 场桥 m 第 i 个任务对应集卡到达的贝位, $B_{im} \in B$; A_{im} : 场桥 m 第 i 个任务对应集卡到达的时刻; H_{im} : 场桥 m 第 i 个任务所需要的作业时间; F_{im} : 场桥 m 完成第 i 个任务的时刻; B_{safe} : 同箱区作业场桥间的安全距离; t_0 : 计划期开始时刻; t_e : 计划期截止时刻; C_0 : 场桥移动单位时间产生的成本; C_{im} : 场桥 m 第 i 次作业对应的集卡等待单位时间产生的成本; T_{turn} : 场桥大车转一次弯所需要时间; T : 外集卡产生等待成本的临界点; T_1 : 内集卡等待时间的上限值; T_2 : 外集卡等待时间的上限值; V_0 : 场桥水平移动速度; L_0 : 单个贝位长度; L_1 : 相邻箱区之间的纵向距离; $t_{(i-1)im}$: 场桥 m 从 $(i-1)$ 任务移动到 i 任务所需要时间, 当 $i=1$ 时, t_{0im} 是指场桥 m 从初始位置移到第一个任务所需时间; Q_{im}^t : 场桥 m 在 t 时刻作业第 i 个任务所处箱区; B_{im}^t : 场桥 m 在 t 时刻作业第 i 个任务所处贝位; C_{im} 为第 m 台场桥第 i 个任务对应集卡单位等待成本。上述参数中, N_m 和 K_{im} 为决策变量。

$$K_{qm}^t = \begin{cases} 1 & \text{如果场桥 } m \text{ 在时刻 } t \text{ 处于 } q \text{ 箱区} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

$$W_{im} = \begin{cases} 0 & \text{场桥第 } i \text{ 次作业对应集卡为内集卡} \\ 1 & \text{场桥第 } i \text{ 次作业对应集卡为外集卡} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{im} = \begin{cases} 1 & \text{场桥第 } i \text{ 次作业对应为送箱作业} \\ 0 & \text{场桥第 } i \text{ 次作业对应为取箱作业} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_{im} = \begin{cases} 0 & W_{im} = 1, \text{且等待时长} \leq T \\ C_1 & W_{im} = 1, \text{且等待时长} > T \\ C_2 & W_{im} = 0, i = 1, 2, 3, \dots, N_m \end{cases} \quad (4)$$

2.3 模型建立

目标函数:

$$g(x) = \text{Min}(f_1 + f_2) \quad (5)$$

$$f_1 = C_0 \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} t_{(i-1)im} \quad (6)$$

$$f_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} C_{im} (F_{im} - S_{im} H_{im} - A_{im} - T W_{im}) \quad (7)$$

式中: f_1 表示完成所有任务场桥的移动总成本; f_2 表示内外集卡等待成本之和。

模型相关约束见表1。

约束①表示各场桥作业量之和, 为总任务量, 且场桥之间的作业量差额在不均衡底线之内; 约束②表示每个作业只分配到1台场桥且只作业1次; 约束③表示任一时刻堆场中的场桥数始终为 M , 且每个箱区最多同时配置3台场桥; 约束④表示如果 i 任务分给 m 场桥, 则 i 任务会在计划期中某个时间点由 m 场桥来完成; 约束⑤表示当场桥处于同一箱区间作业时, 间距不大于安全距离, 且当两台场桥在 t 时刻在同箱区内移动时不会出现跨越现象; 约束⑥表示场桥作业相邻任务所需移动时间的计算公式; 约束⑦表示 m 场桥第 i 个任务完成时间、第 $(i-1)$ 个任务的完成时间、 i 任务与 $(i-1)$ 任务之间的移动时间、 i 任务的集卡到达时间、 i 任务所需作业时间之间的关系; 约束⑧表示集卡等待时间不超过上限; 约束⑨为参数和决策变量的取值约束。

表 1 约束数学表达式

约束表达式	编号
$\sum_{m=1}^M N_m = N; \quad N_{m_1} - N_{m_2} \leq n_{gap}$	①
$K_{im} \neq K_{jm}; K_{im_1} \neq K_{im_2} (i \neq j), i, j = 1, 2, \dots, N_m, m_1 \neq m_2 \text{ 且都} \in \{1, \dots, M\}$	②
$\sum_{q=1}^Q K'_{qm} = \sum_{b=1}^B K'_{bm} = M; \quad \sum_{m=1}^M K'_{qm} \leq 3$	③
$Q_{im} = \sum_{t=t_0}^{t_i} Q'_{im}; \quad B_{im} = \sum_{t=t_0}^{t_i} B'_{im}$	④
$ B'_{im_1} - B'_{jm_2} \geq B_{safe}, \quad \text{当 } Q'_{m_1} = Q'_{m_2}, m_1, m_2 \in \{1, \dots, M\}$	⑤
$t_{(i-1)m} = \begin{cases} \frac{I_0 B_{im} - B_{(i-1)m} }{V_0} & \text{当 } Q'_{(i-1)m} = Q'_{im} \\ \frac{I_0 (B_{im} + B_{(i-1)m}) + I_1 Q'_{im} - Q'_{(i-1)m} }{V_0} + 2 T_{turn} & \text{当 } Q'_{(i-1)m} \neq Q'_{im}, \text{且 } B_{im} + B_{(i-1)m} < B \\ \frac{I_0 (2B - B_{im} - B_{(i-1)m}) + I_1 Q'_{im} - Q'_{(i-1)m} }{V_0} + 2 T_{turn} & \text{当 } Q'_{(i-1)m} \neq Q'_{im}, \text{且 } B_{im} + B_{(i-1)m} \geq B \end{cases}$	⑥
$F_{im} = H_{im} + \max \{ (F(i-1)m + t_{(i-1)m}), A_{im} \}; F_{im} \geq H_{im} + A_{im}$	⑦
$F_{im} - S_{im} H_{im} - A_{im} \leq \begin{cases} T_1, W_{im} = 0 \\ T_2, W_{im} = 1 \end{cases}$	⑧
$C, C_0, C_1, C_2, I_0, I_1, B_0, V_0, B_{safe}, T_1, T_2 > 0; C_{im} \in \{0, C_1, C_2\}, W_{im} \in \{0, 1\}, S_{im} \in \{0, 1\}$ $K_{im} \in \{1, 2, 3, \dots, N\}, N_m \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$	⑨

3 模型求解

多箱区场桥调度问题中每台场桥可以看作一个旅行商，每个任务可以看作一个城市，因此模型类似于带有时间窗的 MTSP 问题，是一个 NP 难问题。本文采用嵌入解空间切割策略与染色体修复技术的改进遗传算法对模型进行求解，算法流程见图 2。

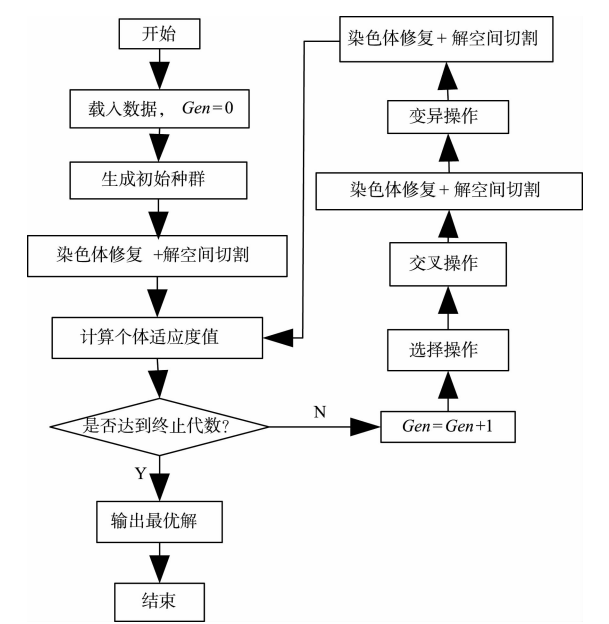


图 2 改进遗传算法流程

3.1 编码

堆场中有 m 台场桥来作业 n 个任务，染色体长度为 $n + m$ 。染色体分为两部分，第 1 部分代表场桥的作业序列，第 2 部分代表每台场桥的作业量（图 3）。解码后每台场桥作业序列见表 2。

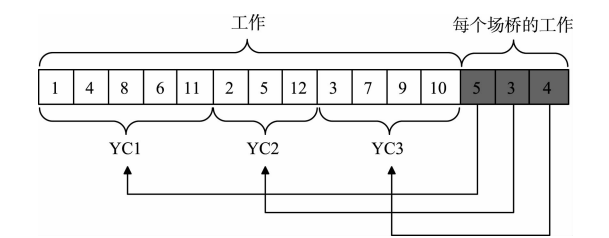


图 3 两部分遗传算法编码

表 2 染色体解码后的作业序列

场桥编号	作业序列
YC1	1→4→8→6→11
YC2	2→5→12
YC3	3→7→9→10

3.2 初始种群的生成

初始种群中染色体的第 1 部分需要满足约束②，第 2 部分需要满足场桥作业之和为总任务量。

3.3 适应度值

适应度值根据目标函数 $g(x)$ 设计, 对于任意给定染色体对应的解 x_i , 其适应度值为

$$Fitness(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{g(x_i)} \\ M \text{ 有集卡超过等待上限进行惩罚} \end{cases}$$

(8)

3.4 选择与交叉操作

本文采取轮盘赌的方式进行选择操作; 交叉操作采取对染色体的两部分分别进行的方式 (图 4)。对于第 1 部分的交叉, 首先在父代中随机选择两个交叉点, 将父代染色体分成左侧、中间、右侧 3 部分, 然后子代 A 保留父代 A 中中间部分的基因及序列, 子代 A 中左右侧所缺基因按照父代 B 中的基因序列依次排列, 最后同样的方法得到子代 B 的基因排列。染色体第 2 部分的交叉操作采取单点无性交叉的方式, 首先在父代 A 中选择一个交叉点, 然后将染色体序列逆转得到子代 A, 这样能保证所得子代染色体满足约束①的两个限制。



图 4 染色体两部分交叉

3.5 变异

本文的变异只针对作业序列即染色体第 1 部分进行, 随机产生 1 到 N 的两个不同的点, 将染色体中的两个基因位上的作业编号互换 (图 5)。这也是针对场桥之间出现跨越现象而进行的染色体修复技术的核心, YC1 在前往任务 6 作业的途中会与 YC2 前往任务 5 作业的途中发生场桥跨越,

此时采取任务互换的方式, 由 YC1 执行任务 5, 而由 YC2 来执行任务 6, 这样即可把发生场桥跨越现象的不可行解转化为可行解, 一定程度上保持了种群的多样性。

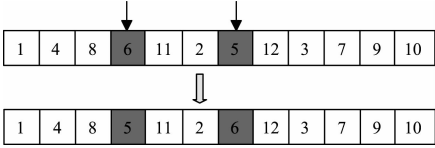


图 5 染色体变异

3.6 解空间切割策略

场桥调度模型要求场桥的作业量差额不超过不均衡底限。初始种群生成、交叉、变异后的个体中可能会出现不可行解。一个解空间切割策略被提出, 具体步骤为:

步骤 1: 按照路径 (解) 的目标值大小倒序地排列各解。

步骤 2: 采用场桥间尽量负载均衡的约束对所有染色体集合 (解空间) 进行切割, 按照顺序逐一删除第 2 部分基因位之间差额大于 n_{gap} 的解。

步骤 3: 判断剩余解个数, 若不为零转到步骤 4; 若剩余解个数为零则转到前续主体算法。

步骤 4: 停止切割操作, 转到后续主体算法。

3.7 算法终止规则

当算法的迭代次数达到规定的迭代上限时, 算法终止, 输出最优解。

4 算例分析

4.1 实例描述

本文选取某集装箱码头堆场固定时段内 (1 h) 的任务量作为数据源, 由 5 台场桥执行 3 个箱区的 40 个任务, 场桥运行参数、集卡等待上限时间及相关费率等见表 3。

表 3 案例参数取值

参数	$v_0/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$T_{\text{turn}}/\text{min}$	T/min	T_1/min	T_2/min	$C_0/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	$C_1/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	$C_2/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	b_{safe}	n_{gap}
取值	90	2	20	30	50	30	10	5	1	6

4.2 算法参数取值

采取控制变量法对改进遗传算法的参数进行赋值, 图 6 显示其他参数一样前提下不同选择概

率下的目标值收敛曲线, 当选择概率为 0.4 时, 收敛的目标值最小。同上进行算法其他参数值的选取, 结果见表 4。

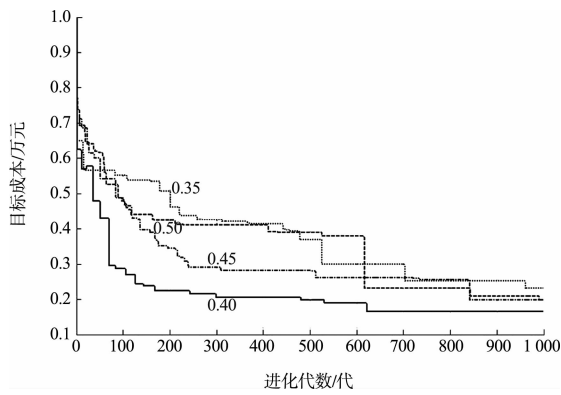


图 6 不同选择概率下收敛曲线

表 4 IGA 参数取值

种群大小	选择概率	变异概率	最大迭代次数
300	0.4	0.15	1 000

4.3 结果分析

采用 4.1 节试验数据与 4.2 节算法参数取值，在 Intel (R) CoreTM i5-2450M 2.50GHZ 的处理器、4GB 内存的 PC 上进行 MATLAB7.6.0 编程求解，在图 7 的算法收敛效果对比中可以看出本文改进遗传算法的目标成本在 541 代收敛于 1 142.8 元，而没有加入解空间切割与染色体修复技术的传统遗传算法在 823 代收敛于 1 690 元，说明 IGA 在算法收敛性与解空间探索上都优于 GA，一定程度上表明了算法的有效性。对应算法最优目标成本的场桥调度方案、场桥作业时间和集卡的等待时间见表 5。场桥实时作业路径展示见图 8，图 8 将纵轴分为 3 个区域代表 3 个箱区，区域纵坐标代表对应箱区内的 1 到 15 贝位；每个点的纵坐标是每个任务的位置，横坐标是每个任务的开始作业时间，即表 5 中的 ST 时刻，箭头为标注的行走路线；实心太阳形标注的点代表相应场桥发生一次转场，完成 1 h 计划期内 40 个任务共进行了 4 次转场；图中 YC2 与 YC3 的两个交点并非产生场桥的跨越，第 1 个交点表示 YC2 是先从堆场 1 的 15 贝位转场至堆场 2 的 15 贝位向左行驶，而 YC3 是从堆场 2 的 1 贝位向右行驶，第 2 个交点表示 YC2 向右行驶至堆场 2 中的 15 贝位后转至堆场 1 中的 15 贝位往左行驶，而 YC3 在堆场 2 中往右行驶过程中并未跨越 YC2。

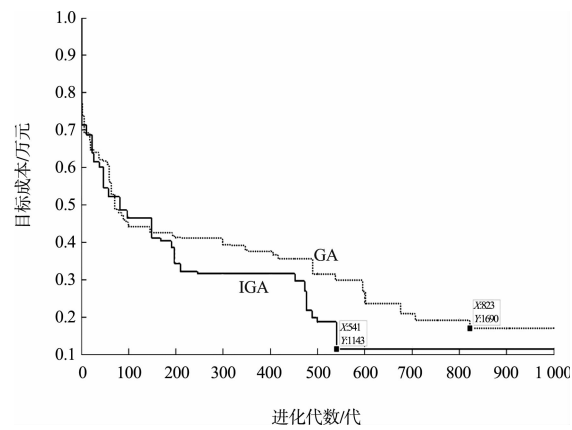


图 7 IGA 与 GA 的收敛效果对比

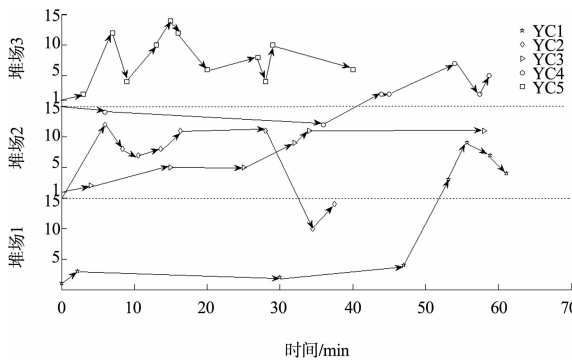


图 8 场桥实时作业路径

场桥邻近作业原则（Nearby）是指每一个任务到来之际，都选择离任务最近的场桥来执行该任务。为了验证模型的有效性，针对 3.3 节试验脚本，将 IGA 求得的结果与场桥临近作业原则得到的调度结果进行比较（表 6），其中集卡等待时间超过其上限，则其等待成本加 100 元的惩罚；场桥间作业差额超过不均衡底线，加 200 元惩罚。利用 Lingo12.0 求得 3.3 节试验脚本对应场桥调度方案（表 7），为了验证改进遗传算法的有效性与稳定性，选取 9 个试验脚本，进行 IGA 与 Lingo 计算结果的比较见表 8。每个脚本下 IGA 的成本计算结果均采取试验 10 次取最优值的方法，CPU 时间取值则为 10 次试验结果的平均值。结果显示 3 种规模下平均 GAP 都在 12% 以内；但是相比 IGA 的 CPU 计算时间，Lingo 的计算时间都在可接受范围之外，表明了 IGA 算法的有效性与稳定性。

表 5 场桥调度方案与作业时刻												
场桥编号	任务序列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
YC1	任务编号	1 → 2 → 22 → 31 → 32 → 34 → 37 → 39										
	ST/min	0.00	2.18	30.00	47.00	53.16	55.69	58.87	61.13			
	FT/min	2.00	4.18	33.00	49.00	55.16	58.69	60.87	63.93			
	WT/min	2.00	1.18	0.00	2.00	4.16	3.69	1.87	1.13			
YC2	任务编号	6 → 8 → 10 → 11 → 12 → 21 → 17 → 18										
	ST/min	6.00	8.36	10.54	13.63	16.30	28.00	34.87	37.82			
	FT/min	8.00	10.46	13.54	16.03	18.30	30.00	37.47	40.82			
	WT/min	0.00	0.36	0.54	2.63	4.30	2.00	14.87	15.82			
YC3	任务编号	4 → 14 → 19 → 23 → 24 → 38										
	ST/min	4.00	15.00	25.00	32.00	34.00	58.00					
	FT/min	6.00	17.00	28.00	33.60	37.00	61.00					
	WT/min	2.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00					
YC4	任务编号	5 → 25 → 26 → 30 → 35 → 33 → 36										
	ST/min	6.00	36.00	43.96	45.00	54.00	57.44	58.71				
	FT/min	8.00	39.00	44.96	47.00	57.00	58.44	60.71				
	WT/min	0.00	0.00	4.96	0.00	0.00	7.44	2.71				
YC5	任务编号	3 → 9 → 7 → 13 → 16 → 15 → 20 → 27 → 28 → 29 → 40										
	ST/min	3.00	10.00	12.71	14.89	18.00	20.28	27.00	41.00	43.36	45.89	60.00
	FT/min	5.00	12.00	14.71	17.49	20.10	21.78	29.00	43.00	45.36	48.89	62.00
	WT/min	0.00	2.00	5.71	0.89	0.00	5.28	0.00	2.00	0.36	2.89	2.00

表 6 IGA 与 Nearby 计算结果对比					
调度规则	$M_{\text{cost}} /$ 元	$W_{\text{cost}} /$ 元	集卡超等待 上限惩罚	超过均衡 底线惩罚	$T_{\text{cost}} /$ 元
IGA	959.33	183.44	0	0	1 142.8
Nearby	938.67	240.33	0	200	1 379

注： M_{cost} 为场桥移动成本； W_{cost} 为集卡等待成本； T_{cost} 为总成本。

表 7 Lingo 求得场桥调度方案	
场桥	作业序列
YC1	1→2→17→18→22→31→32→34→37→39
YC2	6→8→10→11→12→21→21
YC3	4→14→19→23→24→38
YC4	5→25→26→30→35→33→36
YC5	3→9→7→13→16→15→20→27→28→29→40

表 8 IGA 与 Lingo 试验结果对比											
验证脚本		IGA				Lingo			GAP/%		
Scale	Mission	M_{cost}	W_{cost}	T_{cost}	CPU 时间/min	M_{cost}	W_{cost}	T_{cost}	M_{cost}	W_{cost}	T_{cost}
2×3	8×8	320.16	215.17	535.33	0.90	298.39	169.20	467.59	6.80	21.36	12.65
	12×16	432.36	687.95	1 120.31	1.63	530.73	520.19	1 050.92	−22.75	24.39	6.19
	16×18	698.34	496.28	1 194.62	2.65	786.46	210.48	996.94	−12.62	57.59	16.55
	Mean	483.62	466.47	950.09	1.73	538.53	299.96	838.48	−11.35	35.70	11.75
3×5	$4 \times 10 \times 12$	682.17	450.00	1 132.17	4.86	569.35	406.24	975.59	16.54	9.72	13.83
	$6 \times 18 \times 16$	959.33	183.44	1 142.77	6.10	861.30	183.40	1044.70	10.22	0.00	8.58
	$8 \times 20 \times 24$	1 264.70	820.00	2 084.70	10.68	1 463.60	412.82	1 876.42	−15.73	49.66	9.99
	Mean	968.73	484.48	1 453.21	7.21	964.75	334.15	1 298.90	0.41	31.03	10.62
4×8	$6 \times 8 \times 10 \times 12$	418.96	316.40	735.36	21.96	405.38	265.19	670.57	3.24	16.19	8.81
	$12 \times 14 \times 16 \times 20$	635.40	460.00	1 095.40	32.41	590.46	425.79	1 016.25	7.07	7.44	7.23
	$14 \times 16 \times 20 \times 24$	953.74	862.35	1 816.09	54.86	863.29	680.38	1 543.67	9.48	21.10	15.00
	Mean	669.37	546.25	1 215.62	36.41	619.71	457.12	1 076.83	7.42	16.32	11.42

注：Scale 为试验规模（箱区数×场桥数）；Mission 为各箱区任务数。