

求解集装箱码头岸桥调度问题的化学反应算法

王旭^{1,2}, 刘士新², 张瑞友², 王佳³

(1.河北环境工程学院经济学院, 秦皇岛 066102; 2.东北大学信息科学与工程学院流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819;
3.东北大学秦皇岛分校经济学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 研究了集装箱码头卸船作业中的岸桥调度问题。考虑岸桥的时间窗约束, 建立了岸桥卸船作业的仿真优化模型, 设计了一类基于双链分子结构的化学反应算法。该算法的编码包含两部分, 分别为任务的优先关系和为任务分配的岸桥序列, 解码过程采用离散事件动态仿真方法进行。针对问题的特点, 设计了 4 种分子碰撞算子。通过算例生成器生成的仿真数据对模型和算法进行了仿真测试, 结果表明: 与 CPLEX 和遗传算法相比, 该算法可在很短的时间内求得稳定的满意解, 验证了模型和算法的有效性。

关键词: 卸船作业; 化学反应算法; 双链分子结构; 离散事件动态仿真

中图分类号: C934

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 12-3001-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712009

Chemical Reaction Optimization Algorithm for Solving Quay Crane Scheduling Problems of Container Terminal

Wang Xu^{1,2}, Liu Shixin², Zhang Ruiyou², Wang Jia³

(1.School of Economics, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao 066102, China; 2.College of Information Science & Engineering, Northeastern University, State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Shenyang 110819, China;
3.School of Economics, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: This paper researches on quay crane scheduling for unloading operations in container terminal. Considering *quay crane work within its time window*, an unloading scheduling simulation model is established. According to the characteristics of the unloading scheduling simulation model, a *DoubleList Molecular Structure-based Chemical Reaction Optimization (DLMCRO)* algorithm is developed. There are *two parts* in coding: one is *the priority relation of the task*, and the other is *the task-to-quay-node mapping*. *Discrete Event Dynamic Simulation (DEDS)* is used to simulate the decoding process. *Four elementary chemical reaction operations* against the problem are designed. The simulation experiment is made by using data generator. The results of simulation show that DLMCRO can get a stable and satisfactory solution more quickly than CPLEX and GA. And it's proved that the model and algorithm are effective.

Keywords: unloading operation; chemical reaction optimization; double list molecular structure; discrete event dynamic simulation

引言

随着集装箱运输业的不断发展, 集装箱码头

之间的竞争日趋激烈, 如何提高码头的作业效率是码头运营者面临的主要难题。岸桥通常是制约码头作业效率的瓶颈。因此, 岸桥的优化调度问题吸引了很多学者的研究。

Kim 等^[1]研究了单船的岸桥调度问题, 考虑岸桥之间的安全距离等约束, 建立了混合整数规划模型, 采用分支定界算法和贪婪随机自适应搜索算法



收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2016-02-18;
基金项目: 国家自然科学基金(71601040, 61573089, 61333006, 71471034);
作者简介: 王旭(1982-), 男, 辽宁沈阳, 博士生, 研究方向为仿真优化建模; 刘士新(1968-), 男, 辽宁调兵山, 教授, 研究方向为项目管理与优化调度。

<http://www.china-simulation.com>

• 3001 •

对模型进行求解。Bierwirth 等^[2]考虑岸桥的安全距离等约束,建立了岸桥调度的混合整数规划模型,采用分支定界算法对模型进行求解。Legato 等^[3]针对单船的岸桥调度问题,考虑岸桥的均衡使用、岸桥准备时间和结束时间、岸桥之间安全距离等约束,建立了基于 Petri 网的岸桥装卸调度模型,采用分支定界算法对模型进行求解。Fu 等^[4]研究了岸桥移泊问题,考虑同时指派岸桥和确定岸桥任务的执行顺序,建立了岸桥指派和调度混合整数规划模型,采用遗传算法对模型进行求解。由于岸桥调度问题属于 NP-hard 问题^[5],精确算法很难求解中等以上规模问题。因此,学者不断设计更高效的算法来求解岸桥调度问题。

化学反应算法(Chemical Reaction Optimization, CRO)是由 Lam 等^[6]提出的一种元启发式方法。CRO 算法用分子结构表示问题的解,分子的能量由势能和动能组成。势能表示问题的目标函数值,动能表示分子跳出局部最优的能力。根据能量守恒定律,化学反应中分子之间相互碰撞时伴随着势能和动能的相互转换,最终使分子向低势能状态转化。因此,在 CRO 算法中引入了撞墙、分解、交换和合成四种碰撞算子以及能量缓冲区概念。近些年,CRO 算法被广泛地应用于求解组合优化问题。Sun 等^[7]将 CRO 算法与 Lin-Kernighan 算法相结合,提出了改进的 CRO 算法求解 TSP 问题。Pan 等^[8]将 CRO 算法用于求解以最小化网络链接结点数目标的网络编码优化问题。Xu 等^[9]提出了双分子结构的化学反应算法来求解异构计算条件下的有向任务调度问题。Tung 等^[10]将贪婪算法和化学方应算法相结合,提出了一个贪婪化学反应算法来求解 0-1 背包问题。

本文把岸桥卸船调度问题视为多机并行调度问题,考虑了集装箱的处理优先级、岸桥不能交叉作业、岸桥之间要保持一定的安全距离、岸桥需要在其时间窗内工作等约束。针对问题的特点,建立了混合整数规划模型,设计了基于双链分子结构的 CRO 算法。大量随机生成的仿真算例证明了模型

的正确性和算法的有效性。

1 问题描述

如图 1 所示,港口卸船作业中的任务是指完成卸载一个集装箱的仿真过程。一个卸载任务包括 3 个基本操作:①岸桥将集装箱卸载到集卡上;②集卡将集装箱运送至堆场;③堆场龙门吊对集装箱进行堆垛。在上述操作中,岸桥是制约码头作业效率的瓶颈,卸船作业优化中多根据岸桥作业顺序分配集卡,继而分配龙门吊。

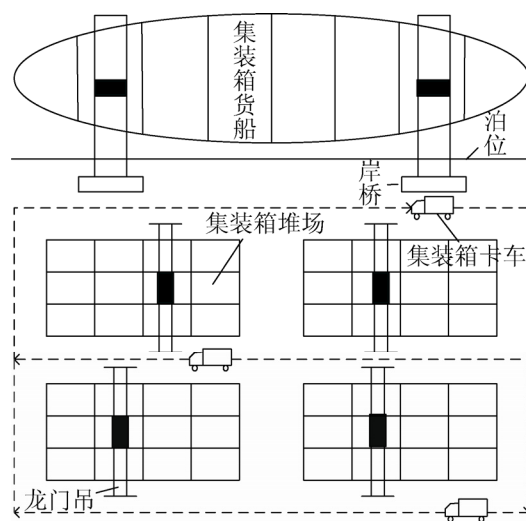


图 1 集装箱码头布局图
Fig.1 Layout of container terminal

岸桥作业具有如下特点:①岸桥工作时间约束:每个岸桥有独立的工作时间窗。②任务间优先关系约束:对于同一垛的集装箱,顶部的集装箱要优于其下部的集装箱卸载。同时,对于同贝同甲板,甲板上集装箱要先于船舱内的集装箱卸载。③岸桥安全距离约束:岸桥作业时保留一个贝位的安全距离。

2 建立仿真优化模型

引入如下符号:

Ω : 任务集合, $\Omega = \{1, 2, \dots, |\Omega|\}$;

$\Omega^0 = \Omega \cup \{0\}$, 其中 0 为虚拟开始任务;

$\Omega^T = \Omega \cup \{T\}$, 其中 T 为虚拟结束任务;

K : 岸桥集合, $K = \{1, 2, \dots, |K|\}$ 按照贝位递增

顺序从小到大进行编号;

p_i : 任务 i 的处理时间;

L_i : 任务 i 所在岸边贝位;

L^k : 岸桥 k 的初始贝位;

δ : 岸桥之间的安全距离;

g : 岸桥空载经过单个贝位的时间;

Γ : 任务之间优先级关系的集合, $(i, j) \in \Gamma$ 表明任务 i 必须在任务 j 之前执行;

E_k : 岸桥 k 工作时间窗的开始时间, $k \in K$;

D_k : 岸桥 k 工作时间窗的结束时间, $k \in K$;

M : 足够大的正数;

决策变量:

ct_i : 任务 i 的结束时间

$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{如果岸桥 } k \text{ 执行任务 } i \text{ 之后执行任务 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果任务在任务 } j \text{ 开始之前完成} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

$z_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{如果岸桥 } k \text{ 执行任务 } i \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

参考文献[11], 可建立如下仿真模型:

$$\min \max_{i \in \Omega} ct_i \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in \Omega^T} x_{0jk} = 1, \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Omega^0} x_{iTk} = 1, \forall k \in K \quad (3)$$

$$z_{ik} = \sum_{j \in \Omega^0} x_{jik}, \forall k \in K, \forall i \in \Omega^T \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega^0} x_{ijk} = 1, j \in \Omega^T \quad (5)$$

$$\sum_{j \in \Omega^0} x_{jik} - \sum_{j \in \Omega^T} x_{ijk} = 0, \forall k \in K, \forall i \in \Omega \quad (6)$$

$$ct_i + p_j - ct_j \leq 0, \forall (i, j) \in \Gamma \quad (7)$$

$$ct_i + p_j \leq ct_j + M \cdot (1 - y_{ij}), \forall i, j \in \Omega \quad (8)$$

$$ct_i + g |L_i - L_j| + p_j - ct_j \leq M \cdot (1 - x_{ijk}), \quad (9)$$

$$\forall k \in K, \forall i \in \Omega^0, \forall j \in \Omega^T$$

$$\sum_{i \in \Omega} L_i \cdot z_{iv} - \sum_{j \in \Omega} L_j \cdot z_{jw} + \delta \leq M \cdot (y_{ij} + y_{ji}), \quad (10)$$

$$L_i < L_j, \forall v, w \in K \text{ 且 } v < w$$

$$y_{ij} + y_{ji} \leq 1, \forall i, j \in \Omega \quad (11)$$

$$ct_i \leq M \cdot (1 - z_{ik}) + D_k, \forall k \in K, \forall i \in \Omega \quad (12)$$

$$ct_i - p_i \geq M \cdot (1 - z_{ik}) + E_k, \forall k \in K, \forall i \in \Omega \quad (13)$$

$$x_{ijk}, z_{ik} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall i \in \Omega^0, \forall j \in \Omega \quad (14)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in \Omega \quad (15)$$

式中: 式(1)为目标函数, 即最小化卸船作业的完成时间; 式(2)和式(3)确保每个岸桥都从虚拟开始任务出发, 最后回到虚拟结束任务; 式(4)确定 z_{ik}, x_{ijk} 之间的关系; 式(5)确保每个任务只能被岸桥执行一次; 式(6)表示流平衡; 式(7)表任务 i 要在任务 j 之前完成; 式(8)确定岸桥卸载任务的先后顺序; 式(9)确定岸桥卸载任务的完成时间; 式(10)避免岸桥之间出现交叉且保留一个贝位的安全距离; 式(11)任务 i 和 j 最多只有一种优先关系; 式(12)和式(13)确定设备执行任务要在其时间窗内完成。

3 基于仿真的 CRO 算法

根据卸船作业调度问题的特征, 设计了一类的双链分子结构化学反应算法(Double ListMolecular based Chemical Reaction Simulation Optimization, DLMCRO), 并仿真算法求解结果。

3.1 分子编码和解码

分子 w 是由长度为 J 的双链编码构成, $w = \{L_w^1, L_w^2\}$, 如图 2 所示。其中, J 为任务总数, L_w^1 中的 J_i 为任务编号, 对应的位置 i 代表该任务的执行顺序。 L_w^2 中的 C_i 为岸桥编号, 对应的位置 i 代表执行任务 J_i 的岸桥。

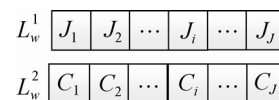


图 2 双链分子编码

Fig.2 Coding of double list molecular

解码过程根据分子 w 的编码, 采用离散事件动态仿真方法执行, 过程描述如下: ①根据 w 的 L_w^1 中任务的执行顺序以及 L_w^2 中对应岸桥指派构成岸桥的任务序列。②初始化未来事件表(Future Event List, FEL)是按照时间升序排列, 存储当前时间发生的事件。③从 FEL 提取最早发生的事件,

触发执行动作。同时,生成未来事件并计算完成时间插入 FEL。④重复③,直到 FEL 为空。计算约束(1)的目标函数值,即为 w 的分子势能。需要说明的是,在岸桥执行卸船任务的过程中按照表 1 中规则避让,要保证约束(8)~(13)的岸桥约束条件,即岸桥的时间窗约束和岸桥安全距离约束。

表 1 岸桥指派规则
Tab.1 Crane assignment rule

规则编号	规则定义
1	若任务 $(i,j) \in \Gamma$,岸桥 C_i 先执行任务 i ,岸桥 C_j 后执行任务 j
2	若 $(i,j) \notin \Gamma$ 且岸桥 C_i 和 C_j 有冲突,指派最早空闲岸桥避让
3	若 $(i,j) \notin \Gamma$ 且岸桥 C_i 和 C_j 无冲突,岸桥 C_i 和 C_j 同时执行

以图 1 所示的码头布局和表 2 的任务数据为例,岸边分为 8 个贝位,从左至右依次编号为 1~8。岸边有 2 台岸桥,从左至右依次编号 1 和 2,岸桥在零时刻开始服务,起始位置分别为 2 和 5。岸桥在相邻贝位移动所用时间为 2min,两台岸桥需保持一个贝位的安全距离。

表 2 任务数据
Tab.2 Data of tasks

任务号	所在贝位	最早开始时间	最晚结束时间	处理时间
1	4	0	15	7
2	4	7	23	8
3	3	12	26	9
4	5	17	35	8
5	1	21	35	7

优先任务关系集合: (3,4)

假设分子 w 的编码为 $w = \begin{bmatrix} 1,2,3,4,5 \\ 0,1,0,1,0 \end{bmatrix}$ 。

岸桥 1 的任务序列为[1,3,5],岸桥 2 的任务序列为[2,4]。当 $t=0$ 时,岸桥 1 执行任务 1,岸桥 2 执行任务 2。根据规则 2,岸桥 1 执行,岸桥 2 避让, $ct_1=11$,生成事件 1 插入 FEL。当 $t=11$ 时,岸桥 1 执行任务 3,岸桥 2 执行任务 2。根据规则 3,岸桥 1 和 2 同时执行, $ct_2=21$, $ct_3=22$ 。从 FEL 删除事件 1,生成事件 2 和事件 3 插入 FEL。当 $t=21$,

岸桥 1 执行任务 3,岸桥 2 执行任务 4,根据规则 1,岸桥 1 先执行,岸桥 2 后执行,从 FEL 删除事件 2。当 $t=22$ 时,岸桥 1 执行任务 5,岸桥 2 执行任务 4。根据规则 3,岸桥 1 和 2 同时执行, $ct_4=32$, $ct_5=33$ 。从 FEL 删除事件 3,生成事件 4 和事件 5 插入 FEL。当 $t=32$ 时,岸桥 1 执行任务 5,岸桥 2 空闲。从 FEL 删除事件 4。当 $t=33$ 时,岸桥 1 空闲,岸桥 2 空闲,从 FEL 删除事件 5。可得目标函数为 33。

3.2 初始解生成

针对分子 w , L_w^1 和 L_w^2 的编码生成过程包含 $|\Omega|$ 个阶段,对应阶段 i 有可行任务集合 E_i , E_i 表示阶段 i 处于垛顶的集装箱卸载任务集合。分子 w 的生成算法流程描述如下:

- 1: 参数初始化: 阶段总数 $|\Omega|$, 岸桥集合 K , 分子 w 为空;
- 2: 令阶段数 $i=0$, 生成垛顶的集装箱卸载任务集合 E_i ;
- 3: While ($i \leq |\Omega|$) Do
 - 从 E_i 中随机取出任务填入 L_w^1 的位置 i ;
 - 从 K 中随机取出岸桥 k 填入到 L_w^2 的位置 i ;
 - $i=i+1$;
 - 更新 E_i ;
- 4: Return 分子 w 。

3.3 化学反应算子

针对双链表分子结构的特点,本文设计了四种分子碰撞算子:撞墙算子、分解算子、交换算子、合成算子。具体描述如下:

3.3.1 撞墙算子

撞墙算子表示分子撞击容器壁后分子结构发生变化的过程。假设撞击前分子结构为 w , 撞击后分子结构为 w' 。当发生撞墙时,满足

$$PE_w + KE_w \geq PE_{w'} \quad (16)$$

式中: PE_w 、 KE_w 分别为分子 w 的势能和动能; $PE_{w'}$ 为分子 w' 的势能。在撞墙中损失的动能被存储在能量缓冲区,用于支持分解反应。撞墙过程中分子按如下过程改变结构: (1)在 w 上随机选择位置 i , 对应的任务为 J_i ; (2)根据任务优先关系向左寻找

J_i 能够左移到达的最小位置 L_i , 根据任务优先关系向右寻找 J_i 能够右移到达的最小位置 R_i ; (3) 在 $[L_i, R_i]$ 区间内随机选择位置 j , 交换位置 i 和 j 上的任务, 生成 w' 。

3.3.2 分解算子

分解算子表示一个分子与容器壁发生碰撞分解产生了两个分子的过程。假设碰撞前分子结构为 w , 碰撞后分解为两个分子 w_1 、 w_2 。当发生分解时, 满足

$$PE_w + KE_w \geq PE_{w_1} + PE_{w_2} \quad (17)$$

式中: PE_w 、 KE_w 分别为分子 w 的势能和动能; PE_{w_1} 、 PE_{w_2} 分别为分子 w_1 、 w_2 的势能。当 KE_w 非常大时, 式(17)才能满足。随着分子不断地碰撞, 动能逐渐减小, 很难满足式(17)。为了实现分解, 利用能量缓冲区补充分子动能。分解过程中分子按如下过程改变结构: (1)以偶数位的任务为基础, 对奇数位的任务采用 3.2 节的启发式方法生成新的任务排序, 填入 w 中奇数位置, 生成分子 w_1 ; (2)以奇数位的任务为基础, 对偶数位的任务采用 3.2 节的启发式方法生成新的任务排序, 填入 w 中偶数位置, 生成分子 w_2 。

3.3.3 交换算子

交换算子表示两个分子相互碰撞后各自弹开的过程。假设碰撞前两分子的分子结构分别为 w_1 、 w_2 , 碰撞后两分子的分子结构分别为 w_1' 、 w_2' 。当发生交换时, 满足

$$PE_{w_1} + PE_{w_2} + KE_{w_1} + KE_{w_2} \geq PE_{w_1'} + PE_{w_2'} \quad (18)$$

式中: PE_{w_1} 、 PE_{w_2} 分别为分子 w_1 、 w_2 的势能; KE_{w_1} 、 KE_{w_2} 分别为分子 w_1 、 w_2 的动能; $PE_{w_1'}$ 、 $PE_{w_2'}$ 分别为分子 w_1' 、 w_2' 的势能。交换过程中分子按如下过程改变结构: (1)在 w_1 上分别随机取位置 i 和 $j(i < j)$; (2)抽取位置区间 $[i, j]$ 上任务, 从 w_2 的最左端将与 w_1 中不重复的任务依次填入 w_1 中, 生成 w_1' ; (3)在 w_2 上分别随机取位置 i 和 $j(i < j)$; (4)抽取位置区间 $[i, j]$ 上任务, 从 w_1 的最左端将与 w_2 中不重复的任务依次填入 w_2 中, 生成 w_2' 。

3.3.4 合成算子

合成算子表示两个分子碰撞后合成一个分子的过程。假设碰撞前两分子的分子结构为 w_1 、 w_2 , 碰撞后分子结构为 w 。当发生合成时, 满足

$$PE_{w_1} + PE_{w_2} + KE_{w_1} + KE_{w_2} \geq PE_w \quad (19)$$

其中: PE_{w_1} 、 PE_{w_2} 分别为分子 w_1 、 w_2 的势能; KE_{w_1} 、 KE_{w_2} 分别为分子 w_1 、 w_2 的动能; PE_w 为分子 w 的势能。为了保证 w 的可行性, 合成算子采用 PPX 方法^[12]。合成过程中分子按如下过程改变结构: (1)随机抽取集合 $\{0,1\}$ 中的元素填充长度为 J 的向量。该向量定义从 w_1 和 w_2 中连续抽取次序。0 表示从 w_1 抽取任务, 1 表示从 w_2 抽取任务; (2)根据向量给定的抽取次序, 从 w_1 、 w_2 的最左端选择与 w 不重复的任务依次填入 w , 直到 w 包含所有任务。

3.4 DLMCRO 算法流程

DLMCRO 算法采用了与 CRO 算法相似的整体框架, 在保留了 CRO 算法优点的基础上, 设计了适合求解双链分子结构的 4 种化学反应算子。具体算法流程如下:

- 1: **参数初始化:** 最大函数评价次数 $FELimit$, 种群规模 $PopSize$, 分子初始动能 KE , 动能损失比例 $KE_{LossRate}$, 分子间碰撞概率 $MoleColl$, 单个分子碰撞次数上限 α 以及最小分子动能阈值 β ;
- 2: 生成种群规模为 $PopSize$ 的初始种群;
- 3: 令函数评价次数 $i=0$, 种群中每个分子的碰撞次数 $Num(w)=0$, 计算种群中每个分子的势能 PE 。
- 4: **While** $i < FELimit$ **Do**
- 5: 生成 $[0, 1]$ 区间随机数 p ;
- 6: **If** $p < MoleColl$ **Then** 从种群中随机选择分子 w ;
- 7: **If** $Num(w) < \alpha$ 且满足式(17) **Then** 分子 w 发生分解, 产生新的分子 w_1 和 w_2 , 更新种群、 $PE(w_1)$ 、 $PE(w_2)$ 、 $KE(w_1)$ 、 $KE(w_2)$, 令 $Num(w_1) = Num(w)+1$, $Num(w_2) = Num(w)+1$, $i=i+2$;
- 8: **Else**
- 9: **If** 满足式(16) **Then** 分子 w 发生撞墙, 产生新的分子 w' , 更新种群、 $PE(w')$ 、 $KE(w')$, 令 $Num(w') = Num(w)+1$, $i=i+1$;
- 10: **Else**
- 11: 从种群中随机选择分子 w_1 和 w_2 ;

12: **If** $KE(w_1) > \beta$ 且 $KE(w_2) > \beta$ 且满足式(19)**Then**
分子 w_1 和 w_2 发生合成, 产生新的分子 w , 更新种群、 $PE(w)$ 、 $KE(w)$, 令 $Num(w) = Num(w_1) + 1$, $i = i + 1$;

13: **Else**

14: **If** 满足式(18)**Then** 分子 w_1 和 w_2 发生交换, 产生新的分子 w_1' 和 w_2' , 更新种群、 $PE(w_1')$ 、 $PE(w_2')$ 、 $KE(w_1')$ 、 $KE(w_2')$, 令 $Num(w_1') = Num(w_1) + 1$, $Num(w_2') = Num(w_2) + 1$, $i = i + 2$;

15: **Return** 最小分子势能及其对应分子结构和算法运行时间。

4 仿真实验与结果分析

DLMCRO 算法应用 C++ 语言编写, 运行于 Windows 7 操作系统的 Core2/2.67GHz, 内存为 4G 的 64 位 HP 兼容机上。为测试算法性能, 本文算法与 CPLEX12.61 和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的仿真结果进行对比。

4.1 仿真算例设计

仿真算例采用文献[12]中的算例生成器, 随机生成 12 组算例, 每组算例参数设置如表 3 所示。同时, 采用文献[13]中的岸桥作业参数, 岸桥在相邻贝位移动所用时间为 2min, 可分配 2~6 台岸桥至该船卸载作业, 作业效率为 30 箱/小时。

表 3 参数设置
Tab.3 Parameter setting

算例组	任务数	贝位数	分布类型	随机种子(个)	优先任务密度(%)
1	8	10	均匀	1	10~30
2	9	10	均匀	1	10~30
3	10	10	均匀	1	10~30
4	11	10	均匀	1	10~30
5	15	15	均匀	1	10~30
6	20	15	均匀	1	10~30
7	50	15	均匀	2	10~30
8	60	15	均匀	2	10~30
9	70	20	均匀	2	10~30
10	80	20	均匀	2	10~30
11	90	20	均匀	2	10~30
12	100	20	均匀	2	10~30

4.2 对比算法

对比算法采用 GA 算法对模型进行仿真测试。

考虑到算法的有效性和解的可行性, 编码采用 3.1 节介绍的编码和解码方式, 初始解采用 3.2 节介绍的方法生产, 遗传算子采用文献[13]中介绍的交叉算子和变异算子。GA 算法中参数设置为: 最大函数评价次数 $Eval=1200$, 初始种群 $PopSize=40$, 迭代数 $Gen=20$, 交叉率 $P_c=0.9$, 变异率 $P_m=0.01$ 。

4.3 仿真实验分析

4.3.1 小规模仿真算例求解

选取任务数 ≤ 20 的小规模算例 1-6, 每组算例取不同的参数值对模型进行分析。采用 CPLEX12.61 对 6 组算例进行求解, CPLEX 的求解时间设定为 5 000 s, 求解结果如表 4 所示, 其中 T 表示算法运行时间(s), Obj 表示目标函数值, 以下表示相同。表 4 的结果表明: ①在任务数保持不变的情况下, 增加岸桥的数量可以显著地降低卸船作业的完成时间, 但两者的变化呈非线性。②在任务数保持不变的情况下, 优先关系数增加对卸载完成时间的影响较小。③在岸桥数保持不变的情况下, 随着任务数增加, 岸桥空载运行时间增加, 导致岸桥干扰现象增多。④在任务数保持不变的情况下, 减小优先任务/岸桥比例, 导致岸桥避让次数增多, 岸桥等待避让时间变长。而增加优先任务/岸桥比例, 虽然岸桥避让次数减小, 但岸桥空载运行次数增多。

采用 GA 和 DLMCRO 算法分别对 6 组小规模算例进行仿真测试, 确保在公平环境下测试算法的有效性, 取相同目标函数评价次数作为两种算法的截止条件。DLMCRO 算法中参数设置为: 最大函数评价次数 $FELimit=1200$, 动能损失比例 $KE_{LossRate}=0.2$, 分子碰撞概率 $MoleColl=0.2$, 初始动能 $InitialKE=400$, 最大分子碰撞次数 $\alpha=2$, 最小分子动能阈值 $\beta=60$ 。每组算例运行 5 次, 取其中最优的结果。两种算法的求解结果分别与 CPLEX 求解结果进行比较, 通过平均偏差(gap)反映求解质量:

$$gap = \frac{Obj_{heu} - Obj_{opt}}{Obj_{opt}} \times 100\% \quad (20)$$

式中: Obj_{heu} 为 GA 或 DLMCRO 的求解结果; Obj_{opt} 为 CPLEX 的求解结果。

如表 5 所示,两种算法均能在较短的时间内求得问题的近优解。随着任务规模增加,两种算法的求解时间相应增大,但增幅比较小。GA 的求解时间均比 DLMCRO 求解时间长,最多为 6.62 倍。与 CPLEX 求解结果相比,GA 的最小偏差为 3.11%,最大偏差为 17.45%。DLMCRO 的最小偏差为 2.22%,最大偏差为 14.77%,DLMCRO 的求解质量均略优于 GA。因此,对于小规模算例,DLMCRO 的求解效果优于 GA。

4.3.2 大规模仿真算例求解

选取任务数大于等于 50 的 6 组大规模算例对

算法进行仿真测试。当任务数增加到 20 以上时,在给定时间内 CPLEX12.61 无法求得最优解。因此,只对比 GA 和 DLMCRO 两种算法的求解结果。两种算法的参数设置与 4.2 节和 4.3.1 节的参数设置相同,每组算例运行 5 次,取其中最优的结果。统计结果如表 6 所示,两种算法均能在较短时间内求得近优解,随着任务规模增加,两种算法的求解时间相应增大。GA 的求解时间均比 DLMCRO 求解时间长,最大为 6.63 倍,最小为 5.38 倍。GA 的求解结果均差于 DLMCRO 的求解结果,最大为 1.13 倍,最小为 1.08 倍。因此,对于大规模算例,DLMCRO 求解效果优于 GA。

表 4 不同配置的小规模算例求解结果
Tab.4 Results of small size instances in different configurations

算例组	Γ =2						Γ =3					
	K =2		K =3		K =4		K =2		K =3		K =4	
	T	Obj	T	Obj	T	Obj	T	Obj	T	Obj	T	Obj
1	7.5	296	5.0	235	5.3	225	7.3	296	5.2	235	5.0	225
2	72.5	306	34.2	252	21.0	239	56.2	306	33.4	252	19.5	239
3	582.5	357	448.9	282	17.0	270	506.5	357	421.1	282	16.9	270
4	-	-	1 311.0	293	638.9	285	-	-	1 286.7	293	684.1	285
5	-	-	-	-	3 065.7	298	-	-	-	-	3 174.2	298
6	-	-	-	-	5 007.3	328	-	-	-	-	5 124.6	328

注:“-”为给定时间内 CPLEX 没有求到最优解;

表 5 小规模算例对比结果
Tab.5 Comparison results of small size instances

算例组	优先任务	岸桥数量	GA			DLMCRO			GA 与 DLMCRO 相比	
			T ₁	Obj ₁	gap	T ₂	Obj ₂	gap	T ₁ /T ₂	Obj ₁ /Obj ₂
1	3	4	1.59	232	3.11	0.24	230	2.22	6.62	1.01
2	3	4	1.73	260	8.79	0.27	253	2.86	6.41	1.03
3	3	4	1.89	309	14.44	0.31	298	10.37	6.10	1.04
4	3	4	2.11	322	12.98	0.36	311	9.12	5.86	1.04
5	3	4	2.71	350	17.45	0.55	342	14.77	4.93	1.05
6	3	4	3.43	372	13.41	0.81	354	7.93	4.23	1.05

表 6 大规模算例对比结果
Tab.6 Comparison results of large size instances

算例组	优先任务	岸桥数量	GA		DLMCRO		GA 与 DLMCRO 相比	
			T ₁	Obj ₁	T ₂	Obj ₂	T ₁ /T ₂	Obj ₁ /Obj ₂
7	4	4	7.30	859	1.40	789	5.21	1.09
8	5	4	9.13	1 021	1.43	939	6.38	1.09
9	6	5	10.74	1 121	1.95	1 017	5.51	1.10
10	7	5	13.28	1 291	2.35	1 138	5.65	1.13
11	8	6	14.75	1 399	2.74	1 270	5.38	1.10
12	9	6	17.43	1 466	2.63	1 354	6.63	1.08

通过对比不同规模算例的仿真测试结果, 深入分析得出结论: GA 是基于种群的搜索方式, 在每次交叉变异后, 更新种群中最优个体, 然后进入下一次迭代。而 DLMCRO 是基于个体和种群相结合的搜索方式, 首先采用撞墙和交换等单个分子碰撞对分子的邻域进行搜索; 当不能在邻域内继续找到最优解时, 采用分解和合成等分子间碰撞跳到另一个区域继续搜索, 以便找到全局最优解。基于种群的搜索方式是在全局范围内搜索最优解, 搜索效率低。基于个体和种群相结合的搜索方式是全局搜索中嵌入局部搜索, 搜索效率高, 跳出局部最优能力强。

4.3.3 不同参数对算法的影响

分别取 DLMCRO 中 $InitialKE$ 为 100、200、300 和 400, 其他参数与 4.3.1 节参数设置相同, 取算例 7 进行仿真测试。统计结果如表 7 所示: 随着分子初始动能增加, 初始阶段分子动能越大, 分子之间无规则运动越剧烈, 分子局部搜索能力增强, DLMCRO 求解结果变好。随着分子间能量转换加快, 分子动能快速减小, 分子局部搜索能力减小, 分子状态缓慢趋于稳定, 导致 DLMCRO 收敛时间增加。

分别取 DLMCRO 中 α 为 1、2、3 和 4, 其他参数与 4.3.1 节参数设置相同, 取算例 7 进行仿真测试。统计结果如表 7 所示: 随着 α 增大, 分子撞墙和交换次数增加, 分子局部搜索能力增强。但随着分子撞墙和交换次数持续增加, 分子动能损失增大, 分子局部搜索能力减弱, 导致 DLMCRO 易于陷入局部最优。此时, 需要减小 β , 增加分子的分解和合成次数, 帮助 DLMCRO 跳出局部最优。

分别取 DLMCRO 中 β 为 50、60、70 和 80, 其他参数与 4.3.1 节参数设置相同, 取算例 7 进行仿真测试。统计结果如表 7 所示: 随着 β 增大, 用于分子无规则运动的动能减小, 化学反应缓慢进行, 求解结果和算法运行时间相应增大。而分子动能减小, 分子碰撞次数减小, 分子的局部搜索能力

和跳出局部最优能力均减弱, 导致 DLMCRO 搜索能力减弱, 甚至搜索不到全局最优解。

表 7 不同值参数的求解结果
Tab.7 Results of different parameters

参数	参数取值	求解时间/s	目标值
$InitialKE$	100	1.31	832
	200	1.35	803
	300	1.38	799
	400	1.40	789
α	1	1.40	789
	2	1.28	859
	3	1.19	908
	4	1.06	917
β	50	1.40	789
	60	1.41	879
	70	1.46	905
	80	1.49	912

5 结论

本文针对卸船作业中岸桥调度特点, 考虑了岸桥之间碰撞、任务的优先关系以及岸桥工作时间窗等实际约束, 建立了岸桥卸船调度的数学模型, 设计了一类 DLMCRO 算法对模型进行求解。针对双链分子结构特点提出了 4 种分子碰撞算子以及分子势能计算方法, 并用大量算例验证模型和算法的有效性。首先, 取小规模算例对算法进行仿真测试, 并与 CPLEX 和遗传算法的结果进行对比, 验证模型的正确性。其次, 取大规模算例对算法进行仿真测试, 与遗传算法的仿真结果对比, 分析算法的有效性。最后, 针对算法参数取不同值的情况进行仿真测试, 分析不同参数值对算法的影响。

参考文献:

- [1] Kim K H, Park Y M. A crane scheduling method for port container terminals[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2004, 156(3): 752-768.
- [2] Bierwirth C, Meisel F. A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints[J]. Journal of Scheduling (S1094-6136), 2009, 12(4): 345-360.
- [3] Legato P, Trunfio R, Meisel F. Modeling and solving rich quay crane scheduling problems[J]. Computers and Operations Research (S0305-0548), 2012, 39(9): 2063-2078.

- [4] Fu Y M, Diabat A, Tsai I T. A multi-vessel quay crane assignment and scheduling problem: Formulation and heuristic solution approach[J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2014, 41(15): 6959-6965.
- [5] Lee D H, Wang H Q, Miao L X. Quay crane scheduling with non-interference in port container terminals[J]. Transportation Research Part E (S1366-5545), 2008, 44(1): 124-135.
- [6] Lam A, Li V. Chemical-reaction-inspired meta heuristic for optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation (S1089-778X), 2010, 14(3): 381-399.
- [7] Sun J, Wang Y T. Hybrid algorithm based on chemical reaction optimization and Lin-Kernighan local search for the traveling salesman problem[C]//2011 Seventh International Conference on Natural Computation, 2011: 1518-1521.
- [8] Pan B, Lam A, Li V. Network coding optimization based on chemical reaction optimization[C]//2011 IEEE Global Telecommunications Conference, 2011: 1-5.
- [9] Xu Y M, Li K L, He L G. A DAG scheduling scheme on heterogeneous computing systems using double molecular structure based chemical reaction optimization[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing (S0743-7315), 2013, 73(9): 1306-1322.
- [10] Tung K T, Li L K, Xu Y M. Chemical reaction optimizations with greedy strategy for 0-1 knapsack problem[J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2013, 13(4): 1774-1780.
- [11] Assadipour G, Ke G Y, Verma M. An analytical framework for integrated maritime terminal scheduling problems with time windows[J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2014, 41(16): 7415-7424.
- [12] Meisel F, Bierwirth C. A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms[J]. Computer and Operations Research (S0305-0548), 2011, 38(3): 683-693.
- [13] 范志强. 考虑任务优先约束的同类岸桥作业调度优化[J]. 运筹与管理, 2013, 22(2): 235-242.
- Fan Z Q. Modeling and solving uniform quay crane scheduling problem with task precedence constraints[J]. Operation Research and Management Science, 2013, 22(2): 235-242.

《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊（光盘版）电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心，发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》，《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》（2017 版）采用的统计源期刊为 20192 种，涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种，ESCI 期刊 5578 种；增补期刊 1762 种。参照中外文学学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标，计算期刊影响力指数(CI)，对国内 6210 种学术期刊排序，遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10%为国际影响力品牌学术期刊。TOP5%以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10%之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。