

求解集装箱码头泊位-岸桥分配多目标算法

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: 针对低碳型集装箱码头连续泊位-岸桥分配问题, 考虑到港时间不确定性和集卡运输能力受限等约束, 建立了以最小化船舶碳排放和平均延迟时间为目标的多目标非线性混合整数规划模型, 采用高效非支配排序的遗传算法(Efficient Non-dominate Sort Genetic AlogrithmII, ENSGA-II)对模型进行求解。针对问题的特点, 设计了4链编码规则和基于滚动仿真的解码规则、带精英选择的PPX交叉算子、多约束下变异算子和不可行解修复算子。通过多组测试算例对算法进行测试, 实验结果表明: 与NSGA-II和MNSGA-II相比, ENSGA-II能快速求得满意解, 适合求解本文问题。

关键词: 低碳; 泊位岸桥分配; 多目标; ENSGA-II; 仿真

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1178-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803051

Integrated Berth and Quay Crane Allocation Multi-objective Algorithm for 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 a continuous berth and quay crane allocation problem for low carbon container terminal. Considering the constraints of stochastic arrival time and limited truck transportation ability, a multi-objective nonlinear mixed integer programming model is established to minimize carbon emissions and average delay time. An efficient non-dominate sorting genetic algorithm II (ENSGA-II) is designed to deal with this problem. According to the characteristics of the problem, encoding rule and decoding rule based on rolling-horizon simulation, PPX crossover operator with elite selection, multi constraints mutation operator and repair operator are adopted. The results of several simulation experiments show that ENSGA-II can get the satisfied solution more quickly than NSGAI and MNSGA-II. Moreover, it's suitable for solving integrated berth and quay crane allocation problem.

Keywords: low carbon; berth and quay crane allocation; multi-objective; ENSGA-II; simulation

引言

随着全球贸易的不断发展, 集装箱运输成为物

流运输的主要手段。研究报告显示, 每年航运业的二氧化碳排放量超过 12 亿吨, 约占全球碳排放总量的 4%^[1]。如何减轻对环境造成的负面效应, 减小船舶的燃料成本, 成为集装箱码头竞争的关键因素。泊位和岸桥是码头的稀缺资源, 合理分配泊位和岸桥, 一方面可以降低码头的运营成本, 提高码头资源利用率; 另一方面可以减小二氧化碳排放



收稿日期: 2016-03-22 修回日期: 2016-06-27;
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, 研究方向为仿真优化建模; 刘士新(1968-), 男, 辽宁调兵山, 博士, 教授, 研究方向为项目管理与优化调度。

http: www.china-simulation.com

• 1178 •

量, 提升码头周围的环境质量。

泊位和岸桥调度的研究经历了由单一资源决策到多资源联合决策的发展过程。单一资源决策以泊位分配问题(Berth Allocation Problem, BAP)和岸桥分配问题(Quay Crane Allocation Problem, QCAP)为主要研究对象。泊位分配可划分为离散型和连续型泊位分配, Imai 等^[2]研究了离散型 BAP, 建立了以最小化船舶在港时间为目标的泊位分配模型。Kim 等^[3]研究了连续型 BAP, 建立了以最小化惩罚成本为目标的泊位分配模型, 采用模拟退火算法对模型进行求解。岸桥分配可划分为单船和多船的岸桥分配, Legato 等^[4]研究单船的 QCAP, 考虑安全距离, 船舶优先权等约束, 建立了基于 Petri 网的岸桥分配模型, 采用分枝定界算法对模型进行求解。Fu 等^[5]研究了多船的 QCAP, 考虑岸桥移泊的情况, 建立了混合整数规划模型, 采用遗传算法对模型进行求解。

与单一资源决策相比, 多资源联合决策就是将岸桥和泊位视为一个整体来考虑, 更能表现出其相互制约的关系, 进而发展成泊位和岸桥分配问题(Berth Assignment and Crane Assignment Problem, BACAP)。Rodriguez 等^[6]研究码头鲁棒优化问题, 建立了随机环境下以最小化船舶等待时间为目标的鲁棒优化模型, 采用改进的遗传算法对模型进行求解。Raa 等^[7]考虑船舶的优先权, 偏好泊位等约束, 建立了以最小化船舶在港时间为目标的混合整数规划模型, 采用混合启发式算法对模型进行求解。肖玲等^[8]研究了连续泊位和岸桥调度问题, 建立了以最小化船舶偏离成本和延迟离港时间为目标的多目标混合整数规划模型, 采用基于滚动优化策略的方法对模型进行求解。Golias 等^[9]将船舶的到港时间视为决策变量, 通过调节船舶的行驶速度来控制船舶的靠泊时间, 建立了以最小化船舶在港时间为目标的泊位分配模型。Du 等^[10]将船舶的油耗作为约束, 建立了混合整数二阶锥规划泊位分配模型, 提出了船舶靠泊废气排放计算方法和在港废气排放计算方法。Song 等^[11]研究了班轮航运

中油耗问题, 考虑到港时间不确定性, 将船舶停靠次数作为约束条件, 建立了以最小化班轮离港时间为目标的班轮调度模型。

以上文献大多以最小化船舶在港时间作为单一目标优化。码头决策者需要对多方面进行综合优化, 希望给出一组最优的调度方案, 因此需要建立多目标优化模型对问题求解。本文通过控制船舶行驶速度来控制船舶靠泊时间, 通过分配岸桥和集卡的数量来控制船舶在港时间, 建立了以最小化船舶碳排放量和平均延迟时间为目标的多目标混合整数规划模型。设计了一类高效非支配排序的遗传算法(Efficient Non-dominate Sort Genetic Algorithm II, ENSGA-II)对模型进行求解, 通过某港口的实际数据对模型和算法进行仿真测试, 证明模型的正确性和算法的有效性。

1 问题描述

泊位和岸桥调度问题如图 1 所示: 横坐标表示时间; 纵坐标表示泊位; 矩形表示在港船舶对港口时空资源的占用; i 表示船舶编号, V_i 表示船舶 i , 括号中的 q_i 表示船舶 i 分配的岸桥数; Lb_i 表示船舶 i 的靠泊位置; Lv_i 表示船舶 i 的长度; AT_i 表示船舶 i 到港时间; ST_i 表示船舶 i 的靠泊时间; DT_i 表示船舶 i 的计划离港时间; P_i 表示船舶 i 的在港时间。

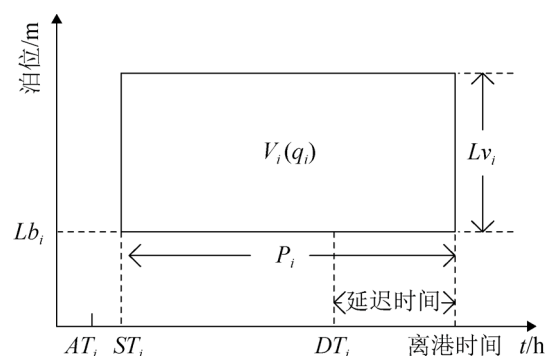


图 1 时间-空间图

Fig.1 Time-space chart

对于船舶 i 的靠泊时间 ST_i , 可以通过调整船舶的航速控制。 ST_i 的取值介于 $[ST_i, \overline{ST_i}]$, 其中,

ST_i 为船舶 i 用最高航速航行时的靠泊时间, $\overline{ST_i}$ 为船舶 i 用最低航速航行的靠泊时间。

在给定航行距离的条件下,船舶油耗和航行速度的关系可用一个下凹的抛物线表示,抛物线的极值点表示船舶的最经济航速。当船速由低速逐渐逼近极值点时,油料消耗减小。而船速逐渐远离极值点时,油料消耗增大。假设船舶 i 从零时刻开始靠泊,船舶 i 距离港口 m 海里行驶到港口过程中的燃油消耗量 f_i 可表示为^[12]:

$$f_i = \frac{1}{24} \cdot \left[c_i^1 + c_i^0 \cdot \left(\frac{m}{(ST_i - AT_i)} \right)^3 \right] \cdot (ST_i - AT_i) - \frac{1}{24} \cdot (c_i^1 \cdot (ST_i - AT_i) + c_i^0 \cdot m^3 \cdot (ST_i - AT_i)^{-2}) \quad (1)$$

式中: c_i^0 为船舶 i 的驾驶员技能系数; c_i^1 为船舶 i 在经济航速下每航行天的辅机柴油消耗量(吨/天)。由于船舶二氧化碳排放量与耗油量成正比,因此上式可以计算相应的二氧化碳的排放量。采用政府间气候变化专门委员会的计算方法,即1吨船用油产生3.17吨的二氧化碳排放量。由式(1)可知,可以通过调整 ST_i 的值实现排放量最小化^[12]。

通过改变航速来控制到港时间,虽然可以减小船舶的碳排放量,但会影响其他船舶的离港时间。因此,为了防止所有船舶都以最佳航速驶进港口造成港口调度困难,进行泊位分配时还需要最小化船舶的平均离港延迟时间,如式(2)所示。

$$f = \min \frac{1}{|I|} \sum_{i \in I} (ST_i + P_i - DT_i) \quad (2)$$

码头决策者不仅希望减小船舶碳排放量,也希望减小船舶的在港时间,进而提高码头的作业效率。保持码头物流畅通需要协调岸桥、集卡等装卸设备,如果岸桥和集卡之间缺乏协调调度,会导致集卡堵塞,岸桥等待集卡等现象发生,延迟船舶的在港时间。因此,本文将岸桥和集卡分配视为瓶颈,,建立泊位和岸桥分配的多目标优化模型。

2 泊位和岸桥分配多目标优化模型

针对本文研究的问题,约定如下: 每艘船舶都有最早和最晚到港时间限制; 每艘船舶只有一次靠泊机会; 停靠泊位要满足船舶的物理条件; 船舶开始服务后不能中途更换泊位; 每艘船舶都有同时作业的最大岸桥数和最小岸桥数限制; 分配每艘船舶的集卡数量不能中途改变。

引入如下数学符号:

- T : 计划展望期;
- t : 时间段编号, $t=1,2,\dots,T$
- I : 计划到港船舶集合;
- Q : 可用岸桥数量;
- m : 船舶等待靠泊位置距港口的距离(海里);
- L : 泊位长度;
- Len : 泊位长度;
- $\overline{q_i}$: 船舶 i 允许同时作业的最大岸桥数;
- q_i : 船舶 i 允许同时作业的最小岸桥数;
- η : 岸桥的装卸效率(标准箱/小时);
- AT_i : 船舶 i 的到港时间;
- C_i : 船舶 i 需要装卸的集装箱数;
- DT_i : 船舶 i 的计划离港时间;
- K : 岸边可用集卡数量;
- γ : 集卡的运输效率(标准箱/小时);
- M : 足够大的整数;
- 决策变量:
- ST_i : 船舶 i 的靠泊时刻;
- q_i : 船舶 i 分配的岸桥数量;
- Lb_i : 船舶 i 的靠泊位置;
- p_i : 船舶 i 的在港时间;
- tr_i : 船舶 i 分配的集卡数量;
- $x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果船舶 } i \text{ 停靠在船舶 } j \text{ 的左侧} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$
- $y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果船舶 } i \text{ 在船舶 } j \text{ 离港之后靠泊} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$
- $z_{it} = \begin{cases} 1, & \text{如果时刻 } t \text{ 船舶 } i \text{ 停靠在泊位} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

则可建立如下数学模型:

$$\min f_1 = \frac{1}{24} \sum_{i \in I} \left(c_i^1 \cdot (ST_i - AT_i) + c_i^0 \cdot m^3 \cdot (ST_i - AT_i)^{-2} \right) \quad (3)$$

$$\min f_2 = \frac{1}{|I|} \sum_{i \in I} (ST_i + p_i - DT_i) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \underline{ST_i} \leq ST_i \leq \overline{ST_i}, \forall i \in I \quad (5)$$

$$Lb_i + Lv_i \leq Len, \forall i \in I \quad (6)$$

$$q_i \leq \bar{q}_i, \forall i \in I \quad (7)$$

$$Lb_j + M(1 - x_{ij}) \leq Lb_i + Lv_i, \forall i, j \in I \quad (8)$$

$$ST_j + M(1 - y_{ij}) \leq ST_i + p_i, \forall i, j \in I \quad (9)$$

$$1 - y_{ij} + y_{ji} + x_{ij} + x_{ji}, \forall i, j \in I \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} Z_{it} \cdot q_i \leq Q, t = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I} Z_{it} \cdot tr_i \leq K, t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

$$p_i = \max \left\{ \frac{C_i}{q_i} \cdot \eta, \frac{C_i}{tr_i} \cdot \gamma \right\}, \forall i \in I \quad (13)$$

$$\sum_{t=ST_i}^{ST_i+p_i-1} Z_{it} = p_i, \forall i \in I \quad (14)$$

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

$$z_{it} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, t = 1, 2, \dots, T \quad (16)$$

其中, 式(3)为目标函数 1, 即最小化船舶碳排放量; 式(4)为目标函数 2, 即最小化船舶平均延迟离港时间; 式(5)表示靠泊时间的取值范围; 式(6)表示泊位长度约束; 式(7)表示实际分配的岸桥数不可超过船舶允许的最大岸桥数和最小岸桥数的限制; 式(8)-(10)表示船舶占用区域不能重叠; 式(11)表示同一时间在港船舶分配岸桥数不超过岸边岸桥总数; 式(12)表示同一时间在港船舶分配集卡数不超过岸边集卡总数; 式(13)表示船舶的在港时间计算公式; 式(14)表示 Z_{it} 和 p_i 的关系。式(15)和(16)表示决策变量定义。

3 ENSGA-II 算法

非支配排序遗传算法(Non-dominate Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)是 Deb 等^[13]提出的一种在 NSGA 算法基础上改进的非支配排序遗传算法。NSGA-II 目前是求解多目标优化问题的最有效算法之一, 已经取得广泛成功应用^[14-16]。本文提出一种 ENSGA-II 对模型进行求解。

ENSGA-II 是在标准 NSGA-II 的框架下, 采用高效的非支配排序算法, 提高非支配排序过程的效率, 减小算法运行时间。针对问题的特点, 设计了 4 链编码规则和基于滚动窗口仿真的解码规则。为了增强算法的求解质量, 设计了精英选择算子、PPX 交叉算子和多约束下的单点变异算子。同时, 设计了不可行修复算子对交叉变异后的不可行解进行修复, 保证解的可行性。

3.1 算法流程

记种群规模为 $PopSize$, 最大迭代数为 Gen , 非劣解层数为 L , 非劣解集合为 $F_i(i=1, 2, 3, \dots, L)$, 拥挤度为 Cd 。

ENSGA-II 算法流程如下:

步骤 1 初始化参数: $PopSize$, Gen , $F_i = \Phi$, Cd , 生成初始种群 Pop 。

步骤 2 评价个体: 计算 Pop 中每个个体的目标函数值 f_1, f_2 。

步骤 3 高效非支配排序: 对 Pop 中个体进行高效非支配排序并生成 $F_i(i=1, 2, 3, \dots, L)$ 。

步骤 4 交叉算子: 对 Pop 中个体两两配对进行交叉操作得到 Pop' 。

步骤 5 变异算子: 对 Pop' 中每个个体进行变异操作得到 Pop'' 。

步骤 6 合并算子: 对 Pop 和 Pop'' 进行合并得到种群规模为 $2 * PopSize$ 的种群 $MergePop$ 。

步骤 7 高效非支配排序及计算拥挤度: 对 $MergePop$ 进行高效非支配排序并生成 F 并计算拥挤度 Cd 。

步骤 8 生成子代: 以 $MergePop$ 中 $F_i(i=1, 2, 3, \dots, L)$ 和 Cd 为基础, 生成新一代种群数为 $PopSize$ 的种群 Pop 。

步骤 9 判断终止条件: 若未达到迭代代数 Gen , 转到步骤 2, 否则终止算法并输出最好解。

3.2 编码和解码

个体 $P = [ST, Lb, q, tr]^T$, 由长度为 $|I|$ 的 4 层基因链构成。其中, $ST = [ST_1, ST_2, \dots, ST_{|I|}]$, $Lb = [Lb_1,$

$Lb_2, \dots, Lb_{|I|}$, $q=[q_1, q_2, \dots, q_{|I|}]$, $tr=[tr_1, tr_2, \dots, tr_{|I|}]$ 。每个基因所在位置表示船号, 基因链 ST , Lb , q , tr 采用实数编码, 分别表示靠泊时间、靠泊位置、分配的岸桥数和集卡数。

采用滚动时间窗口策略对个体 P 进行仿真解码, 解码流程如下:

步骤 1 令 $I(t)=0$, 初始化已靠泊的船舶集合 $I(t)=\Phi$, 未靠泊的船舶集合 $I'(t)=I$, 将 $I'(t)$ 中船舶按照靠泊时间 ST_i 升序排列, 令 $t=0$;

步骤 2 选择 $\Omega_t = \{i | ST_i = t, i=1, 2, \dots, |I|\}$, 并更新 $I(t)=I(t) \cup \Omega_t$, $I'(t)=I'(t) \setminus \Omega_t$;

步骤 3 $I(t)$ 中靠泊船舶的岸桥数量和集卡数量已知, 根据式(14)计算其离港时间;

基于滚动窗口仿真解码过程的数值算例:

假设到港船舶数 $|I|=4$, 个体

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 6 \\ 100 & 256 & 426 & 658 \\ 2 & 5 & 2 & 3 \\ 5 & 10 & 5 & 7 \end{bmatrix}, \quad \text{任务数据}$$

$$Data = \begin{bmatrix} C \\ c^0 \\ c^1 \\ DT \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200 & 600 & 180 & 210 \\ 0.09 & 0.11 & 0.07 & 0.08 \\ 1.7 & 2.2 & 2.0 & 1.9 \\ 6 & 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}。其中,$$

$C=[C_1, C_2, \dots, C_{|I|}]$, $c^0=[c_1^0, c_2^0, \dots, c_{|I|}^0]$, $c^1=[c_1^1, c_2^1, \dots, c_{|I|}^1]$, $DT=[DT_1, DT_2, \dots, DT_{|I|}]$ 。泊位长度为 1 200 m, 岸边岸桥数为 12 台, 岸桥的装卸效率为 30 标准箱/h。岸边集卡数为 30 台, 集卡的运输效率为 12 标准箱/h。计划展望期为 12 h, 以 1 h 作为一个时间段, 从零时刻开始船舶陆续到港, 船舶距港口 60 海里处等待靠泊。

令 $t=0$, 初始化 $I(t)=\Phi$ 和 $I'(t)=\{1, 2, 3, 4\}$, $I'(t)$ 中船舶按照靠泊时间升序排列。当 $t=0$ 时, 没有船舶靠泊。当 $t=1$ 时, 船舶 1 靠泊, 更新 $\Omega_1=\{1\}$, $I(1)=\{1\}$, $I'(1)=\{2, 3, 4\}$, 在港时间 $p_1=4$, 实际离港时间为 5 h。当 $t=2$ 时, 没有船舶靠泊。当 $t=3$ 时, 船舶 2 靠泊, 更新 $\Omega_3=\{2\}$,

$I(3)=\{1, 2\}$, $I'(3)=\{3, 4\}$, 在港时间 $p_2=5$, 实际离港时间为 8 h。当 $t=4$ 时, 没有船舶靠泊。当 $t=5$ 时, 船舶 3 靠泊, 船舶 1 离港。更新 $\Omega_5=\{3\}$, $I(5)=\{1, 2, 3\}$, $I'(5)=\{4\}$, 在港时间 $p_3=3$, 实际离港时间为 8 h。当 $t=6$ 时, 船舶 4 靠泊。更新 $\Omega_6=\{4\}$, $I(6)=\{1, 2, 3\}$, $I'(6)=\Phi$, 在港时间 $p_4=3$, 实际离港时间为 9 h。当 $t=7$ 时, 没有船舶靠泊。更新 $\Omega_7=\{4\}$, $I(7)=\{1, 2, 3\}$, $I'(7)=\Phi$ 。当 $t=8$ 时, 没有船舶靠泊, 船舶 2 和船舶 3 离港。更新 $\Omega_8=\{4\}$, $I(8)=\{1, 2, 3\}$, $I'(8)=\Phi$ 。当 $t=9$ 时, 没有船舶靠泊, 船舶 4 离港。更新 $\Omega_9=\Phi$, $I(9)=\{1, 2, 3, 4\}$, $I'(9)=\Phi$ 。可得目标函数 $f_1=15.24$, $f_2=0.25$ 。

3.3 生成初始种群

个体 P 的生成过程描述如下:

步骤 1 基因链 ST 在满足式(5)的条件下, 随机生成靠泊时间;

步骤 2 基因链 Lb 在满足式(6)的条件下, 沿空闲泊位的最左端分配靠泊位置;

步骤 3 在船舶靠泊后, 基因链 q 在满足式(7)和(11)的条件下, 随机分配连续位置的岸桥。

步骤 4 在分配岸桥后, 如果基因链 tr 在满足式(12)的条件分配集卡 $tr_i = q_i \cdot \eta / \gamma$, $i \in I$; 否则, 根据表 1 的规则权重由高到低, 找出满足对应规则条件的在港船舶分配集卡 $tr_i = q_i \cdot \eta / \gamma$, $i \in I'$, 而剩余在港船舶分配集卡 $tr_j = q_j \cdot \sum_{j \in I'} q_j \cdot K'$, $j \in I'$ 。其中,

I' 为满足规则条件的在港船舶集合, I' 为未满足规则条件的在港船舶集合, K' 为剩余集卡数。

表 1 集卡分配规则

Tab. 1 Rules of truck allocation

规则名称	考虑因素	规则权重	选择	定义
规则 1	紧急权重	1	min	π_i
规则 2	延迟靠泊时间	2	max	ΔST_i
规则 3	在港时间	3	min	P_i

注: π_i , ΔST_i 分别为船舶 i 的紧急权重和船舶 i 延迟靠泊时间。

3.4 高效非支配排序

多目标算法中的非支配排序过程是最占用算法运行时间的,提高非支配排序的效率,可以显著地减小算法运行时间。ENSGA-II 采用文献[17]的高效非支配排序算法 (Efficient Non-dominate Sorting, ENS)能显著地减小算法运行时间,已经被许多学者应用到多目标算法中^[18]。表 2^[17]给出 ENS 对比于几种常用的非支配排序算法如擂台赛法则^[20] (Arena's Principle, AP)、演绎排序^[21] (Deductive Sort, DS)和快速非支配排序^[13] (Fast Non-dominate Sort, FNS)的空间复杂度和时间复杂度,可见 ENS 的空间复杂度由 $O(N^2)$ 降到 $O(1)$, 时间复杂度由原来的 $O(MN^2)$ 降到 $O(MN\sqrt{N})$, 其中, M 为目标个数, N 为种群的规模。

表 2 4 种非支配排序算法的
空间复杂度和时间复杂度对比
Tab.2 Time and space complexities
of four non-dominated sorting methods

算法名称	空间复杂度	时间复杂度	
		最好情况	最坏情况
ENS	$O(1)$	$O(MN\sqrt{N})$	$O(MN^2)$
AP	$O(N)$	$O(MN\sqrt{N})$	$O(MN^2)$
DS	$O(N)$	$O(MN\sqrt{N})$	$O(MN^2)$
FNP	$O(N^2)$	$O(MN^2)$	$O(MN^2)$

ENS 的关键思想是:假设个体 P 属于 F_i , 必须满足: 1)在 $F_j(j < i)$ 中至少有一个个体支配 P ; 2)在 $F_k(k = i)$ 中没有个体支配 P 。算法流程描述如下:

步骤 1 初始化 $i=0, j=0$ 非劣解层数 $L=0$, 非劣解集 $F_i=\Phi$, 对 Pop 按照某一目标函数值升序排列;

步骤 2 遍历 F_i 中个体,若没有个体支配 P , 则 $P \in F_i$, 转到步骤 5; 否则, 转到步骤 3;

步骤 3 令 $i=i+1$, 若 $i=L$, 转到步骤 4; 否则, 转到步骤 2;

步骤 4 令 $L=L+1$, 则 $P \in F_L$;

步骤 5 令 $i=0, j=j+1$, 若 $j=PopSize$, 结束; 否则, 转到步骤 2。

3.5 交叉算子

为了提高种群的质量,保留种群中的最优个体。采用带精英选择的 PPX 交叉算子对种群个体进行交叉。带精英选择的 PPX 交叉算子描述如下:

步骤 1 保留非劣解集 F_1 中个体到子代 Pop' ;

步骤 2 若 Pop' 的种群规模小于 $PopSize$, 从 F_1 中随机选择个体 P_1 和从非劣解集 $F_i(i = 1)$ 中随机选择个体 P_2 ;

步骤 3 随机抽取集合 $\{0, 1\}$ 中的元素填充长度为 $|I|$ 的向量, 该向量定义从 P_1 和 P_2 中连续抽取次序, 0 表示从 P_1 抽取, 1 表示从 P_2 抽取;

步骤 4 根据向量给定的抽取次序和元素的位置, 从 P_1 和 P_2 的最左端将与该元素位置相对应的基因组依次插入子代个体 P , 直到 P 长度为 $|I|$;

步骤 5 转到步骤 2, 直到 Pop' 的种群规模为 $PopSize$ 为止。

3.6 变异算子

变异算子采用单点变异方式对种群中个体进行概率为 P_m 的变异。生成 $[0, |I|]$ 区间随机数 j , 位置 j 上的基因值 ST_j 和 Lb_j , 即船舶 j 的靠泊时间和靠泊位置按照式(17)进行变异。

$$p'_{ij} = \begin{cases} p_{ij} + \Delta \cdot (1 - r^{(1-G/Gen) \cdot S}), & \text{如果 } r = \text{random}(0, 1) > 0.5 \\ p_{ij} - \Delta \cdot (1 - r^{(1-G/Gen) \cdot S}), & \text{否则 } r = \text{random}(0, 1) < 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

式中: p_{ij} 表示父代个体 i 的基因位 j ; p'_{ij} 表示子代个体 i 的基因位 j ; r 为 $[0, 1]$ 区间的随机数; Δ 表示变动范围; G 表示当前迭代数; Gen 表示最大迭代数; S 表示变异步长。基因链 3, 即分配给船舶 j 的岸桥数, 在 $[q_j, \bar{q}_j]$ 之间随机产生。而基因链 4, 即分配给船舶 j 的集卡数, 在 $[q_j \cdot \eta/\gamma, \bar{q}_j \cdot \eta/\gamma]$ 之间随机产生。

3.7 不可行修复算子

经过交叉和变异的子代,可能产生不可行个体。因此,需要对不可行个体进行修复,保证子代可行。

针对模型的特点，对不可行个体中每个基因位 i ，设计了不可行修复算子如下：

步骤 1 检查靠泊时间是否满足式(5)，若不满足，则靠泊时间改为在 $[ST_i, \overline{ST_i}]$ 中取随机数；

步骤 2 检查靠泊位置是否满足式(6)，若不满足，则靠泊位置改为 $Lb_i = Len - Lv_i$ ；

步骤 3 检查分配完毕的船舶是否满足式(8)~(10)，若不满足，则重新分配泊位。若仍然找不可行的靠泊位置，否则令 $ST_i = ST_i + 1$ ，直到找到可行的靠泊位置；

步骤 4 检查分配的岸桥数是否满足式(7)，如果不满足式(7)，令 $ST_i = ST_i + 1$ ，直到满足式(7)；

步骤 5 检查 t 时刻分配的岸桥数是否满足式(11)，如果不满足，按照 3.3 节介绍的启发式方法生成新的可行解；

步骤 6 检查 t 时刻分配的集卡数是否满足式(12)，如果不满足，按照 3.3 节介绍的启发式方法生成新的可行解。

4 仿真算例生成与结果分析

ENSGA-II 采用 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。为了验证模型的正确性，采用 LINGO11 对本文模型进行求解。为了测试算法的有效性，本文算法与 NSGA-II 算法和 MNSGA-II^[22] 的求解结果进行对比。

4.1 仿真算例设计

本文取不同到港船舶数($|I|=10, 15, 20$)的 3 个算例进行仿真测试，表 3 数据取值采用文献[23]的到港船舶数据。每种规模的算例均采用如下设置：泊位长度为 1 200 m，岸边岸桥数为 12 台，岸桥的装卸效率为 30 标准箱/h。岸边集卡数为 30 台，集卡的运输效率为 12 标准箱/h。计划展望期为 60 h，以 1 h 作为一个时间段，从零时刻开始船舶陆续到港，船舶距港口 60 海里处等待靠泊。

表 3 到港船舶数据
Tab. 3 Arrival ship data

船号	船长 /m	装卸数量 /箱	紧急 权重	最大航速 海里/h	最小航速海 里/h	可用最大 岸桥/台	可用最小 岸桥/台	计划离港 时间/h	驾驶员技 能系数	每航行天柴油 消耗/(吨/天)
1	100	200	2	24	16	3	1	3	0.09	1.7
2	300	1 330	1	24	18	5	2	8	0.11	2.2
3	262	420	2	24	16	3	1	9	0.12	2.0
4	156	210	2	24	14	3	1	12	0.11	1.9
5	169	105	2	22	14	2	1	15	0.09	1.9
6	209	632	1	23	15	4	2	18	0.13	2.0
7	80	112	2	22	14	2	1	20	0.12	1.7
8	243	857	1	23	16	4	2	21	0.10	2.1
9	211	100	2	24	14	2	1	21	0.09	2.0
10	261	672	1	24	15	4	2	23	0.08	2.0
11	215	832	1	24	16	5	2	25	0.16	2.0
12	263	1 080	1	24	16	3	1	27	0.08	2.1
13	136	475	2	22	16	3	1	28	0.08	1.8
14	100	153	2	22	16	2	1	28	0.11	1.7
15	164	390	2	23	14	3	1	30	0.10	1.8
16	143	400	2	24	16	4	2	30	0.09	1.8
17	128	207	1	23	15	3	1	32	0.12	1.7
18	183	590	1	24	16	5	2	33	0.10	1.9
19	294	555	2	24	14	4	2	34	0.11	2.2
20	156	369	1	24	15	4	1	36	0.09	1.8

注：船长中包括船舶的安全距离。

4.2 对比算法

为了更好的检验所提出的 ENSGA-II 的有效性, 对比算法采用 NSGA-II 算法和 MNSGA-II 算法为比较对象。

NSGA-II 算法的编码和解码采用 3.2 节介绍的编码和解码方式, 非支配排序采用标准 NSGA-II 算法中的非支配排序, 选择算子采用锦标赛选择, 遗传算子采用文献[24]的交叉算子和变异算子。参数设置如下: 种群规模 $PopSize=20$, 最大迭代代数 $Gen=20$, 交叉概率 $P_c=0.85$, 变异概率 $P_m=0.1$ 。

MNSGA-II 算法的编码和解码采用 3.2 节介绍的编码和解码方式, 非支配排序和选择算子与原文相同, 遗传算子采用文献[24]的交叉算子和变异算子。参数设置如下: 种群规模 $PopSize=20$, 最大迭代代数 $Gen=20$, 交叉概率 $P_c=0.8$, 变异概率 $P_m=0.1$ 。

4.3 仿真实验与结果分析

4.3.1 单目标优化算例

由于本文模型属于多目标非线性整数规划模型, LINGO11 不能直接求解多目标模型。因此, 可将多目标模型拆分成两个单目标模型, 即模型 I 和模型 II。模型 I 包括约束(3)和约束(5)-(16), 模型 II 包括约束(4)-(16)。表 4 为 LINGO11 分别对模型 I 和模型 II 的 3 个算例的求解结果。表 5 为 $|I|=10$

时, 在给定时间为 2 000 s 内, LINGO11 对模型 I 和模型 II 可以求到最优解, 其中 f_1 和 f_2 表示目标函数值, T 表示算法运行时间。当 $|I|=15$ 和 $|I|=20$, 在给定时间内 LINGO11 对模型 I 和模型 II 无法求到最优解。

表 4 LINGO 求解结果

Tab. 4 Results of LINGO

$ I $	模型 I		模型 II	
	f_1 /吨	T/s	f_2 /吨	T/s
10	238.62	1 816	10.66	1 195

注: “-”为给定时间内 LINGO 没有求到最优解。

4.3.2 多目标优化算例

用 ENSGA-II 对算例 2 进行仿真, 图 2 为随机取一个解的时间-空间图。在多目标优化时, 需要同时考虑各个目标对模型的影响, 开始阶段泊位空闲, 到港船舶接近经济航速进港。随着船舶密集到港, 码头空闲泊位紧张, 到港船舶需要调整航速进港, 保证在港船舶延迟时间最小。最后阶段随着离港船舶增多, 码头泊位空闲, 船舶接近经济航速到港。

每个时间段内岸桥使用量如图 3 所示, 在时段 16~24 h, 28~39 h 岸桥相对利用率较高, 船舶到港集中。其他时段岸桥利用率较低, 船舶到港稀疏。其中岸桥最大利用率接近 100%, 最小利用率为 8.3%, 平均利用率为 45.7%。

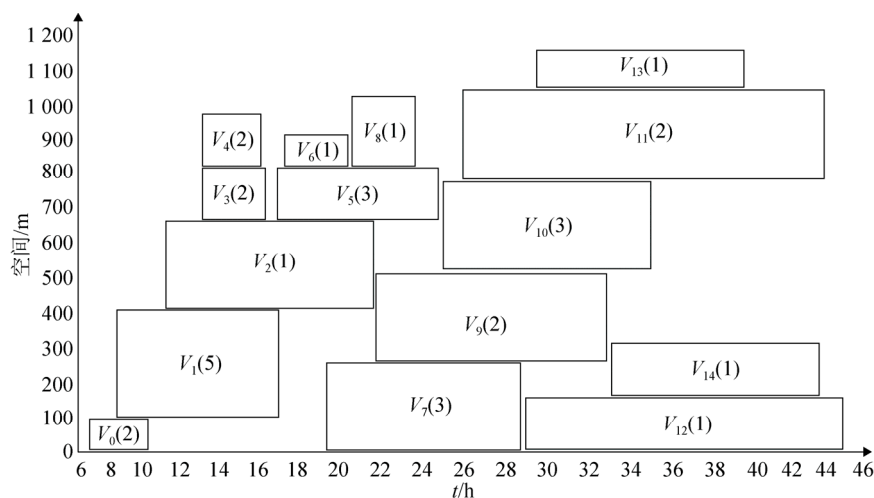


图 2 多目标优化时间-空间甘特图

Fig. 2 Time-space chart for multi-objectives optimization

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

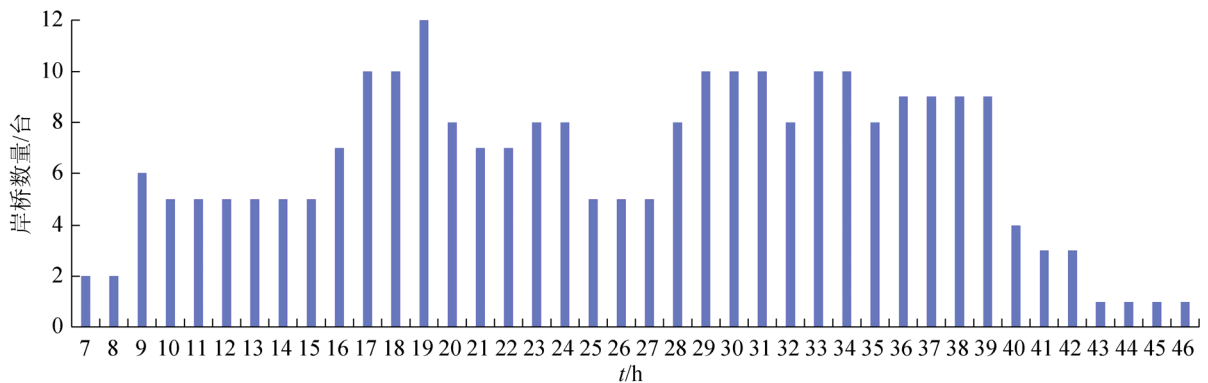


图 3 多目标优化岸桥使用数量
Fig. 3 Utilization of QC for multi-objectives optimization

4.3.3 算法对比分析

用 3 种算法分别对 3 个算例进行仿真,针对每个算例运行 10 次,分别生成 Pareto 解集。应用 Zitzler^[25]提出的 C 指标来评价算法所获得的 Pareto 解集的优劣,如(18):

$$C(X,Y)=\frac{|y\in Y|\exists x\in X:x\succ y|}{|Y|}\tag{18}$$

式中 :X和 Y 分别表示两种算法获得的 Pareto 解集。若 C(X,Y)=1 表示对于 Y 中的任一个非支配解 ,X 中总存在支配它的解 ;C(X,Y)=0 表示对于 Y 中的任一个解 ,X 中都不存在支配它的解。表 5 和表 6 分别给出了 3 种算法的 C 指标和非支配解个数的对比 ,表中 α、β 和 γ 分别表示 NSGA-II、MNSGA-II 和 ENSGA-II。从 C 指标上分析 ,ENSGA-II 的仿真结果优于 NSGA-II 和 MNSGA-II ,获得的非支配解均能支配 NSGA-II 和 MNSGA-II 获得的非支配解 ,且 ENSGA-II 算法具有较好的稳定性。从非支配解个数对比分析 ,ENSGA-II 获得的非支配解的个数多于 NSGA-II 和 MNSGA-II ,且随着问题规模的增大 ,ENSGA-II 获得的非支配解的数量优势越明显。

采用线性加权法按照表 7 的 9 组目标权重系数取值将 LINGO11 的求解结果与其他 3 种算法的求解结果进行比较。

图 4 给出了 LINGO11 和其他 3 种算法分别针对 3 个算例获得的 Pareto 解分布情况和求解时间的对比。显然 ,LINGO11 求得最优解 ,线性加权后

的 Pareto 解均支配其他 3 种算法的 Pareto 解。而 ENSGA-II 获得的非支配解无论从数量还是分布性都要优于 NSGA-II 和 MNSGA-II ,并且 ENSGA-II 的求解时间均优于 NSGA-II 和 MNSGA-II。

表 5 3 种算法的 C 指标对比
Tab. 5 Comparison of experiment result on three algorithms via C index

I	算法	平均值	标准差	最优值	最差值
10	$C(\gamma,\alpha)$	1.0	0.0	1.0	1.0
	$C(\gamma,\beta)$	1.0	0.0	1.0	1.0
	$C(\alpha,\gamma)$	0.0	0.0	0.0	0.0
	$C(\beta,\gamma)$	0.0	0.0	0.0	0.0
15	$C(\gamma,\alpha)$	1.0	0.0	1.0	1.0
	$C(\gamma,\beta)$	1.0	0.0	1.0	1.0
	$C(\alpha,\gamma)$	0.0	0.0	0.0	0.0
	$C(\beta,\gamma)$	0.0	0.0	0.0	0.0
20	$C(\gamma,\alpha)$	1.0	0.0	1.0	1.0
	$C(\gamma,\beta)$	1.0	0.0	1.0	1.0
	$C(\alpha,\gamma)$	0.0	0.0	0.0	0.0
	$C(\beta,\gamma)$	0.0	0.0	0.0	0.0

表 6 3 种算法获得 Pareto 解集数量对比
Tab. 6 Comparison of experiment result on three algorithms via Pareto fronts

I	算法	平均值	标准差	最优值	最差值
10	α	14.46	1.26	12.20	16.16
	β	14.44	1.50	12.01	16.39
	γ	13.29	1.82	10.80	16.16
15	α	18.98	1.85	16.23	21.56
	β	18.84	2.02	15.81	21.67
	γ	17.87	1.85	15.03	20.54
20	α	23.05	2.41	19.45	26.55
	β	22.68	2.64	18.59	26.65
	γ	21.19	3.02	17.55	25.55

表 7 权重系数取值 Tab. 7 Weight coefficient									
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
模型 I	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
模型 II	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

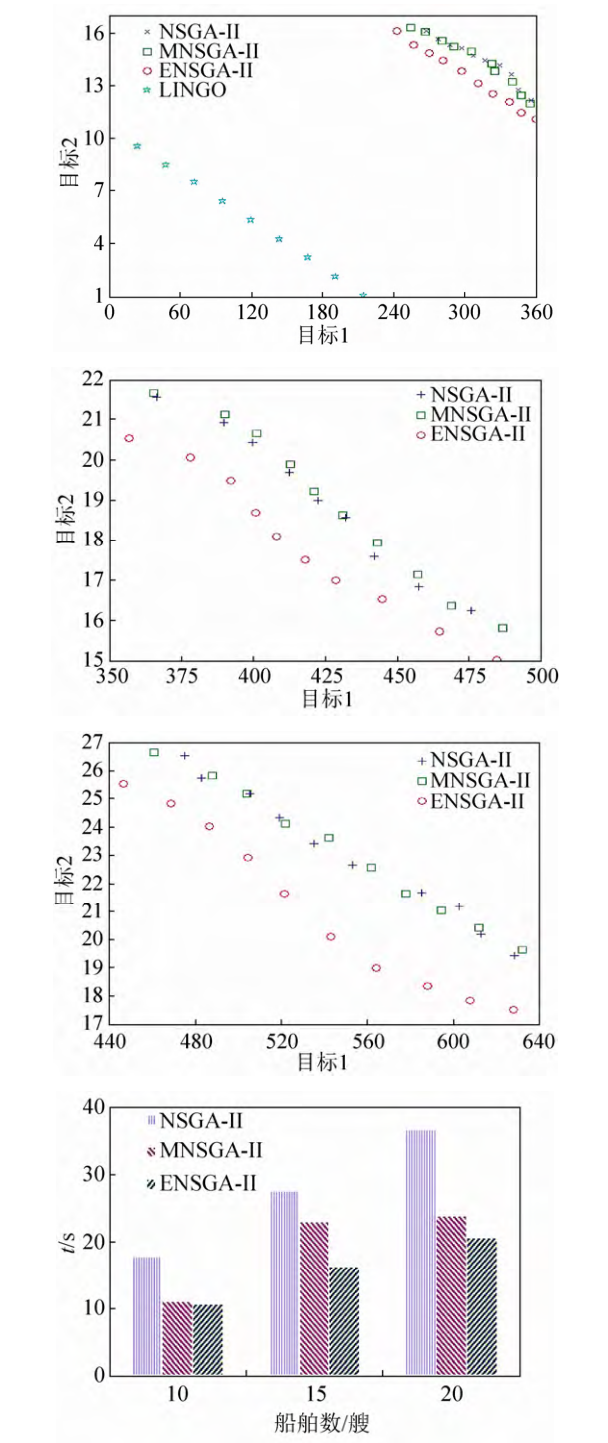


图 4 不同算例的 Pareto 解集和求解时间对比
Fig. 4 Comparison of Pareto fronts and solution time on four algorithms

4.3.4 不同码头参数对算法的影响

分别取岸桥数为 8, 12, 16, 采用 ENSGA-II 对算例 2 进行仿真, 获得 Pareto 解分布情况如图 5。随着岸桥数增加, 各时间段内可分配的岸桥数增加, 单位时间内装卸集装箱数量增加, 船舶在港时间减小。而空闲泊位增加, 到港船舶接近经济航速进港, 船舶碳排放量减小。

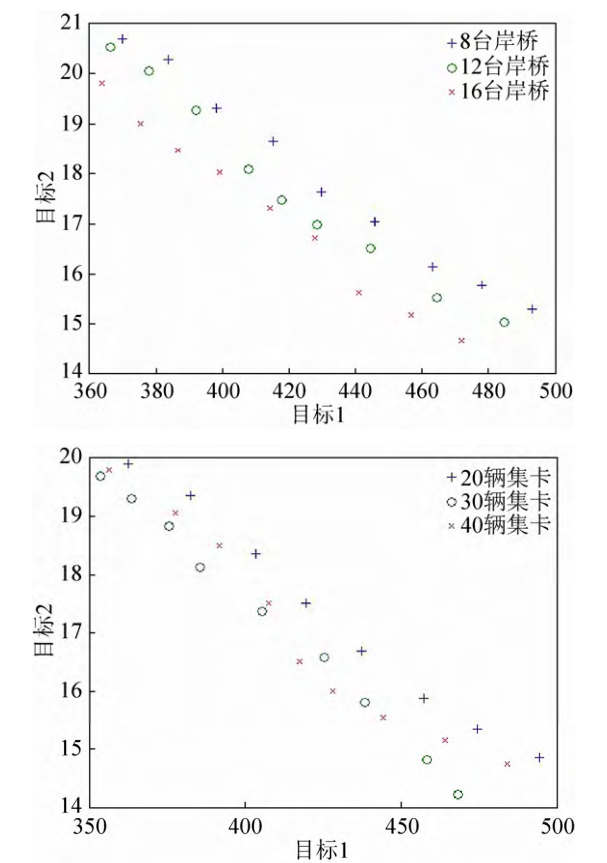


图 5 不同岸桥数和集卡数的 Pareto 解集对比
Fig. 5 Comparison of Pareto fronts on different QCs and trucks

分别取集卡数为 20, 30, 40, 采用 ENSGA-II 对算例 2 进行仿真, 获得 Pareto 解分布情况如图 5。随着集卡数增加, 单位时间内可分配的集卡数增加, 单位时间内运输集装箱数量增加。但单位时间内岸桥装卸量一定, 过多集卡导致阻塞, 船舶在港时间增加。

5 结论

本文研究低碳型码头泊位和岸桥分配问题, 通

过合理地选择船舶靠泊时间和分配泊位-岸桥来减小码头碳排放量和船舶延迟离港时间。进一步考虑集卡运输能力约束,建立了以最小化船舶碳排放量和延迟时间的多目标整数规划模型。设计一类高效非支配排序的遗传算法对模型进行求解。针对问题的特点,设计了编码和基于滚动窗口仿真的解码规则、精英选择算子、PPX交叉算子,单点变异算子和不可行修复算子。首先,通过LINGO11对模型进行求解,验证模型的正确性。其次,与LINGO11、NSGA-II和MNSGA-II结果进行对比,验证算法有效性。最后,通过设置不同参数值对算法进行测试,分析不同码头参数对算法求解结果的影响。需要提出的是本文仅考虑了船舶驶进港口时产生的碳排放量,而没有考虑船舶在港时碳排放,虽然船舶停泊时相对于船舶行驶时的碳排放更少,但是停泊时船舶辅机所产生的废气也容易造成码头周围环境污染。因此,模型中考虑船舶在港时碳排放,将是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] Sakai H, Watanabe Y. The estimation model of carbon dioxide emission at container terminals[J]. Journal of Japan Industrial Management Association(S2187-9079), 2006, 57(1): 68-79.
- [2] Imai A, Chen H C, Nishimura E. The simultaneous berth and quay crane allocation problem[J]. Transportation Research Part E(S1336-5545), 2008, 44(5): 900-920.
- [3] Kim K H, Moon K C. Berth scheduling by simulated annealing[J]. Transportation Research Part B(S0191-2615), 2003, 37(6): 541-560.
- [4] Legato P, Trunfio R, Meisel F. Modeling and solving rich quay crane scheduling problems[J]. Computers & Operations Research(S0305-0548), 2012, 33(9): 2063-2078.
- [5] Fu Y M, Diabat A. A multi-vessel quay crane assignment and scheduling problem: formulation and heuristic solution approach[J]. Expert Systems with Applications(S0957-4174), 2014, 41(15): 6959-6956.
- [6] Rodriguez-Molins M, Ingolotti L, Barber F. A genetic algorithm for robust berth allocation and quay crane assignment[J]. Progress in Artificial Intelligence(S2192-6352), 2014, 2(4): 177-192.
- [7] Raa B, Dullaert W. An Enrich model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem[J]. Expert Systems with Application(S0957-4174), 2011, 38(11): 14136-14147.
- [8] 肖玲, 胡志华. 基于滚动策略的集装箱码头连续泊位与桥吊集成调度[J]. 计算机应用, 2013, 33(10): 2969-2973.
Xiao L, Hu Z H. Berth allocation problem with quay crane assignment of container terminals based on rolling-horizon strategy[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(10): 2969-2973.
- [9] Golias M, Boile M. The berth allocation problem: optimizing vessel arrival time[J]. Maritime Economics & Logistics(S1479-2931), 2009, 11(4): 358-377.
- [10] Du Y Q, Chen Q S. Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions[J]. Transportation Research Part E(S1336-5545), 2011, 47(6): 1021-1037.
- [11] Song D P, Xu J J. An operational activity-based method to estimate CO₂ emissions from container shipping considering empty container repositioning[J]. Transportation Research Part D(S1361-9209), 2012, 17(1): 91-96.
- [12] 赵刚. 国际航运管理[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2006: 93-94.
Zhao G. International shipping management[M]. Dalian: DALIAN Maritime Publisher, 2006: 93-94.
- [13] Deb K, Pratap A, Agarwal S. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGAII[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation(S1089-778X), 2002, 6(2): 184-197.
- [14] Ebrahimi M, Ghomi S M T F, Karimi B. Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates[J]. Applied Mathematical Modelling(S0307-904X), 2014, 38(9): 2490-2504.
- [15] Abedi M, Seidgar H. Bi-objective optimization for scheduling the identical parallel batch-processing machines with arbitrary job sizes, unequal job release times and capacity limits[J]. International Journal of Production Research(S0020-7543), 2015, 53(6): 1680-1711.
- [16] Zarandi M H F, Kayvanfar V. A bi-objective identical parallel machine scheduling problem with controllable processing times: a just-in-time approach[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology(S0268-3768), 2014, 77(1): 545-563.
- [17] Zhang X Y, Tian Y, Cheng R, et al. An efficient approach to nondominated sorting for evolutionary multiobjective optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation(S1089-778X), 2015, 19(2): 201-213.

(下转第1194页)

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

- Shortest Paths Using Modified Pulse-coupled Neuralnetwork [J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2015 (149): 1162-1176.
- [6] Justin Yates, Sujeevraja Sanjeevi. A Length-based Multiple-resource Formulation for Shortest Path Network Interdiction Problems in the Transportation Sector [J]. International Journal of critical infrastructure protection(S1874-5482), 2013, 6(2):107-119.
- [7] Dreyfus S E. An Appraisal of Some Shortest Path Algorithms [J]. Operations Research(S1109-2858), 1969, 17(3): 395-412.
- [8] Kaufman D E, Smith R L. Fastest Path in Time-dependent Networks for Intelligent Vehicle-highway Systems Application [J]. IVHS Journal (S1547-2442), 1993, 11(1): 1-11.
- [9] Liang Wen, Bülent Catay, Richard Eglese. Finding a Minimum Cost Path between a Pair of Nodes in a Time-varying Road Network with a Congestion Charge [J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2014 (236): 915-923.
- [10] Derya Sever, Nico Dellaert, Tom van Woensel, et al. Dynamic shortest path problems: Hybrid Routing Policies Considering Network Disruptions [J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2013, 40(12): 2852-2863.
- [11] Jianhang Gao, Qing Zhao. Dynamic Shortest Path Algorithms for Hypergraphs [C/OL]//IEEE ACM Transactions on Networking, 2015. http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html for more information.
- [12] 张明川. 生物启发的智慧路由机制与协议研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- Mingchuan Zhang. Research on Bio-inspired Smart Routing Mechanism and Protocols[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [13] 郑皓天. 基于带宽剩余率的脉冲耦合神经网络最短路径搜索[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- Zheng Haotian. The search of the shortest path based on the pulse coupled neural network [D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [14] 王宇鹏. 基于分时隙通信的卫星网络路由算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- Wang Yupeng. Routing Algorithm Research of Satellite Network Based on Timeslot Communication[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [15] 杨建芳, 高岩, 王宏杰. 多层建筑物应急疏散模型和算法[J]. 系统仿真学报, 2014, 16(2): 267-273.
- Yang Jianfang, Gao Yan, Wang Hongjie. Multi-storied Building Emergency Evacuation Model and Algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2014, 16(2): 267-273.
-
- (上接第 1188 页)
- [18] Mishra S, Mondal S, Saha S. Improved solution to the non-domination level update problem[J]. Applied Soft Computing(S1568-4946), 2015, 8(1): 1-18.
- [19] Wang H, Zhang Q, Jiao L. Regularity model for noisy multiobjective optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics(S1083-4419), 2015, 8(99): 1-13.
- [20] Tang S, Cai Z, Zheng J. A Fast method of constructing the non-dominated set: Arena's Principle[C]// The 4th International Conference on Natural Computation, Jinan, 2008: 391-395.
- [21] McClymont K, Keedwell E. Deductive sort and climbing sort: new methods for non-dominated sorting[J]. Evolutionary Computation(S1063-6560), 2012, 20(1): 1-26.
- [22] Bandyopadhyay S, Bhattacharya R. Solving multi-objective parallel machine scheduling problem by a modified NSGA-II[J]. Applied Mathematical Modelling (S0307-904X), 2013, 37(10): 6718-6729.
- [23] 张红菊, 乐美龙. 基于多目标粒子群算法的泊位-岸桥分配研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(2): 59-64.
- Zhang H J, Le L M. Research on container berth-quay crane allocation based on multi-objective PSO[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(2): 59-64.
- [24] 杨春霞, 王诺. 基于多目标遗传算法的集装箱码头的泊位岸桥分配问题研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1720-1722.
- Yang C X, Wang N. Berth-quay crane allocation in container terminal based on multi-objective genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(5): 1720-1722.
- [25] Zitzler E. Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: methods and applications[D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1999.