

考虑使用优先权的泊位分配和船舶调度集成优化^①

牛 猛^② 王钟逸 李亚军 郑红星^③

(大连海事大学交通运输工程学院 大连 116026)

摘 要 本文针对单向航道单港池的离散泊位散货港口,对固定计划期内船舶调度和泊位分配的集成问题进行研究,考虑了船舶进出港与船舶靠离泊的时间和空间的约束,重点兼顾了由于船舶靠泊优先权引起的移泊问题带来的现实限制,构建了以船舶总在港时间最小为目标的集成优化模型,设计了免疫遗传算法进行求解,并给出了泊位分配方案、移泊方案以及船舶进出港调度方案。通过算例实验,验证了方案和算法的有效性,并分析了进出港口时段长度和拥有优先权船舶的数量对集成调度方案的影响,可为港口的实际作业提供决策支持。

关键词 使用优先权;移泊;散货码头;船舶调度;泊位分配

0 引 言

在散货码头中,船舶的进出港以及靠泊相互影响,泊位分配计划和船舶进出港次序互相制约,为提高港口海侧的作业效率,有必要将泊位分配和船舶调度集成优化。考虑到单航道散货港口的实际情况,港方为精品客户预留泊位情况时有发生,即有些抵港船舶拥有泊位的优先使用权,而一般散货港口的船舶流量密度大但泊位数量有限,由此带来的减载移泊增加了协同调度的难度,是当前散货港口研究的热点问题之一。

针对泊位分配和船舶调度等相关问题,国内外学者对其进行了大量的研究,根据研究的侧重点不同,可以分为泊位分配、船舶调度以及泊位分配和船舶调度协同优化 3 个方面。

现有的研究中,在泊位分配方面,孙少文等人^[1]在离散泊位分配问题中考虑了潮汐因素,以船舶总在港时间最短为目标,用 CPLEX 进行求解。官培堃等人^[2]在背包问题的解决思路上,以泊位利用

率最大为目标函数,设计了遗传算法进行求解。刘慧莲等人^[3]考虑了船舶到港时间不确定的因素,建立了泊位和岸桥分配的鲁棒优化模型,设计了分支定界算法进行求解。Schepler 等人^[4]研究了船舶到港时间不确定情况下的离散泊位分配问题,以船舶总周转时间最小为目标,对比了不同求解的方法的解决效率。Wawrzyniak 等人^[5]研究了泊位分配问题的算法选择问题,以算法组合的运行时间和泊位分配问题的解决方案为目标,对不同算法组合进行了实验分析。

在船舶调度方面,柴佳祺等人^[6]研究了散货码头连续性泊位的排船问题,建立了以岸线排船数量最大和单船滞期靠泊时间最小的双目标优化模型,设计了启发式算法求解。Lalla-Ruiz 等人^[7]研究了进出港船舶调度问题,以船舶的等待时间最短为目标,建立了混合整数数学模型,并设计了启发式算法进行求解。郑红星等人^[8]考虑了减载移泊对于船舶进出港调度问题的影响,建立了以总船舶进出港等待时间最小的混合整数规划模型,设计了混合算法求解。郑红星等人^[9]考虑了潮汐对于船舶调度

① 国家自然科学基金(71473024)和智慧港口背景下集装箱码头绿色服务供应链协同优化策略研究(71872025)资助项目。
② 男,1996 年生,硕士生;研究方向:交通运输规划与方法;E-mail: xixihahaniumeng@126.com
③ 通信作者,E-mail: zhredstar@dlmu.edu.cn
(收稿日期:2019-11-25)

问题的影响以及船舶进出单向航道的现实约束,构建了混合整数线性规划模型,并设计了改进和声搜索算法求解。

在泊位分配和船舶调度集成优化方面,郑红星等人^[10]考虑了船舶进出港及泊位作业的实际约束,以成本最小为目标,构建了混合整数规划模型,采用和声搜索算法求解。Zhang 等人^[11]研究了泊位分配与船舶调度集成优化问题,以船舶等待时间最小为目标,建立了协同优化模型,设计了模拟退火多种群遗传算法进行求解。

上述文献中,在泊位分配方面,主要是以船舶在港时间最短为目标函数,考虑港池内的时空约束;但是单独考虑泊位分配问题,泊位空闲时,船舶未必能按期抵达泊位。在船舶调度方面,大多数文献考虑船舶在航道中的时空约束,但是船舶能进港时,泊位未必可用。在泊位分配和船舶调度协同优化方面,已有文献将二者协同考虑,但罕有涉及船舶泊位优先权带来的影响。因此,本文重点考虑船舶泊位优先权对泊位分配和船舶调度的时空限制,兼顾不同移泊方案对二者的影响,给出合理有效的泊位分配和船舶调度的协同优化方案。

- 本文与已有文献的不同之处主要有以下 2 点:
- (1) 考虑了船舶泊位优先权对泊位分配与船舶调度集成优化的影响;
 - (2) 设计了港池内移泊和驶离港池等待二次进港的 2 种减载移泊方案。

1 问题描述

随着船舶大型化的趋势,以及我国散货贸易的繁荣,对散货港口的泊位资源愈发不足。因此,很多航运企业通过投资入股港口等方式,获得了某些散货港口的泊位优先使用权,一旦该公司的船舶抵达这些港口,即可使用固定泊位进行装卸,无需等待;当拥有优先权的船舶未抵达港口时,这些泊位才可分配给其他公司的船舶。散货码头的示意图如图 1 所示。

本文的问题中,到港船舶中有一定数量的拥有泊位使用优先权的船舶,它们有不同的目的泊位;港

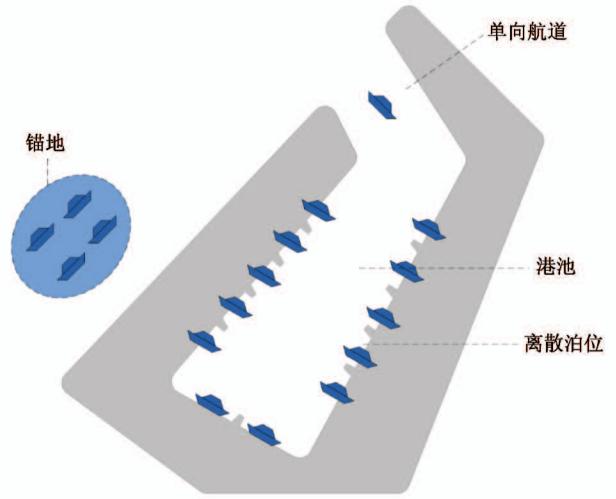


图 1 港池以及泊位分布情况示意图

口配备单向航道,船舶在航道中不可追越及会遇,且保持安全航距;以 48 h 为一个调度周期,后续抵港的船舶为下一周期的研究对象。船舶进出港作业流程为:船舶抵港后一般先在锚地等待,按进港次序轮在进港时段内经航道进港,进行靠泊作业;当某艘船完成装卸作业后,在出港时段按次序出港;其中对于拥有泊位优先权的船舶需在到港后最近的进港时段内进港,需要移泊的船舶则要在最近的出港时段内进行移泊。

本文的问题可描述为针对某个拥有离散泊位和单向航道的散货港口,在一个 48 h 的调度周期中,已知船舶到港时间、船舶作业时间、船舶进出港航行时间、船舶移泊耗时、港口进出港时段等相关信息后,以船舶总在港时间最短为目标建立协同优化模型,研究考虑使用优先权影响下的泊位分配和船舶调度集成优化问题,最终给出船舶的进出港次序以及泊位分配计划,以及由于泊位使用优先权而产生的移泊方案。

2 考虑使用优先权的泊位分配和船舶调度集成优化模型

2.1 基本假设

泊位类型为离散泊位;船舶到港后在外锚地等待;船舶靠泊需要满足泊位长度限制;船舶预计到港时间已知;船舶卸载时间已知。

2.2 符号说明

(1) 集合

SV : 船舶集合, $i = (1, 2, \dots, I) \in SV$; SB : 泊位集合, $j = (1, 2, \dots, J) \in SB$; SR : 船舶服务顺序集合, $k = (1, 2, \dots, K) \in SR$ 。

(2) 参数

E_i : 船舶抵达港口锚地的时刻, $E_i > 0$; A_i : 船舶 i 的工作时间, $A_i > 0$; B_i : 船舶长度, $B_i > 0$; L_i : 泊位长度, $L_i > 0$; M : 足够大的数; C_i : 船舶 i 从锚地到泊位的航行时间, $C_i > 0$; H : 船舶安全航行时间间隔; D_i : 船舶 i 的移泊时间, $D_i > 0$; T : 港口一个进港出港时段所持续的时间, $T > 0$; α 、 β 、 γ : 需要减载的船舶编号。预定船舶编号为 4 号、7 号、15 号, 目的泊位编号为 2 号、4 号、7 号。

(3) 决策变量

x_{ijk} : 0-1 变量, 表示非移泊船舶的停靠位置信息。若 i 船以 k 次序在 j 泊位上靠泊, 则 $x_{ijk} = 1$, 否则 $x_{ijk} = 0$ 。

f_{ijk} : 0-1 变量, 表示需要移泊的船舶的第 1 次停靠的位置信息。若 i 船以 k 次序在 j 泊位上靠泊, 则 $f_{ijk} = 1$, 否则 $f_{ijk} = 0$ 。

s_{ijk} : 0-1 变量, 表示需要移泊的船舶的第 2 次停靠的位置信息。若 i 船以 k 次序在 j 泊位上靠泊, 则 $s_{ijk} = 1$, 否则 $s_{ijk} = 0$ 。

y_{ijk} : 以 k 次序在 j 泊位上靠泊的 i 船的进港时刻, $y_{ijk} > 0$ 。

t_{ijk} : 表示移泊船舶 i 第 1 次停靠时, 以 k 次序在 j 泊位上靠泊的 i 船的进港时刻, $t_{ijk} > 0$ 。

u_{ijk} : 表示移泊船舶 i 第 2 次停靠时, 以 k 次序在 j 泊位上靠泊的 i 船的进港时刻或者开始移泊的时刻, $u_{ijk} > 0$ 。

z_{ijk} : 表示船舶 i 离泊准备进入航道的时刻, $z_{ijk} > 0$ 。

n_{ijk} : 表示需要移泊的船舶 i 第 1 次停靠结束准备进入航道或准备移泊的时刻, $n_{ijk} > 0$ 。

o_{ijk} : 表示需要移泊的船舶 i 第 2 次停靠结束准备进入航道的时刻, $o_{ijk} > 0$ 。

g_i : 0-1 变量, 若 i 船为需要进行移泊的船舶, 则 $g_i = 1$, 否则为 0。

p_i : 0-1 变量, 若 i 船移泊的目标泊位为空泊位, 则 $p_i = 0$, 否则为 1。

q_i : 移泊船舶 i 第 1 次靠泊的工作时间, $0 < q_i < A_i$ 。

2.3 数学模型

$$\begin{aligned} \min W = & \sum_i \sum_j \sum_k \{ [z_{ijk} - (E_i - C_i) \times x_{ijk}] \\ & + [n_{ijk} - E_i \times f_{ijk}] \\ & + [o_{ijk} - n_{ijk} + C_i \times s_{ijk}] \} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $[z_{ijk} - (E_i - C_i) \times x_{ijk}]$ 为不需移泊的船舶第 1 次靠泊在港时间, $[n_{ijk} - E_i \times f_{ijk}]$ 为移泊船舶第 1 次靠泊在港时间, $[o_{ijk} - n_{ijk} + C_i \times s_{ijk}]$ 为移泊船舶移泊后的在港时间。

$$x_{ijk} \leq M \times (1 - g_i) \quad (2)$$

$$f_{ijk} \leq M \times g_i \quad (3)$$

$$s_{ijk} \leq M \times g_i \quad (4)$$

$$y_{ijk} \leq M \times x_{ijk} \quad (5)$$

$$t_{ijk} \leq M \times f_{ijk} \quad (6)$$

$$u_{ijk} \leq M \times s_{ijk} \quad (7)$$

$$z_{ijk} \leq M \times x_{ijk} \quad (8)$$

$$n_{ijk} \leq M \times f_{ijk} \quad (9)$$

$$o_{ijk} \leq M \times s_{ijk} \quad (10)$$

$$y_{ijk} \geq e_i \times x_{ijk} \quad (11)$$

$$t_{ijk} \geq e_i \times f_{ijk} \quad (12)$$

$$(1 - p_i) \times u_{ijk} \geq (\sum_j \sum_k n_{ijk} + D_i) \times s_{ijk} \times (1 - p_i) \quad (13)$$

$$p_i \times u_{ijk} \geq (\sum_j \sum_k n_{ijk} + c_i) \times s_{ijk} \times p_i \quad (14)$$

$$z_{ijk} \geq y_{ijk} + (c_i + A_i) \times x_{ijk} \quad (15)$$

$$n_{ijk} \geq t_{ijk} + (c_i + q_i) \times f_{ijk} \quad (16)$$

$$(1 - p_i) \times o_{ijk} \geq [u_{ijk} + (A_i - q_i) \times s_{ijk}] \times (1 - p_i) \quad (17)$$

$$p_i \times o_{ijk} \geq [u_{ijk} + (A_i + c_i) \times s_{ijk}] \times p_i \quad (18)$$

$$\sum_j \sum_k x_{ijk} = 1 - g_i \quad (19)$$

$$\sum_j \sum_k f_{ijk} = g_i \quad (20)$$

$$\sum_j \sum_k s_{ijk} = g_i \quad (21)$$

$$\sum_k x_{ijk} \times b_i \leq l_i \quad (22)$$

$$\sum_k f_{ijk} \times b_i \leq l_i \quad (23)$$

$$\sum_k s_{ijk} \times b_i \leq l_i \quad (24)$$

$$\sum_i g_i = 3 \quad (25)$$

$$g_\alpha = g_\beta = g_\gamma, \alpha = 4, \beta = 7, \gamma = 15 \quad (26)$$

$$\sum_k f_{\alpha 2k} \times k + 1 = \sum_k x_{42k} \times k \quad (27)$$

$$\sum_k f_{\beta 4k} \times k + 1 = \sum_k x_{74k} \times k \quad (28)$$

$$\sum_k f_{\gamma 7k} \times k + 1 = \sum_k x_{157k} \times k \quad (29)$$

$$(1 - g_{i1}) \times (1 - g_{i2}) \times (y_{i2jk2} - z_{i1jk1} - c_{i1}) \geq M(x_{i1jk1} + x_{i2jk2} - 2),$$

$$i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2, k_1 \in SR, k_2 \in SR, k_1 < k_2 \quad (30)$$

$$(1 - g_{i1}) \times g_{i2} \times (t_{i2jk2} - z_{i1jk1} - c_{i2}) \geq M(x_{i1jk1} + f_{i2jk2} - 2),$$

$$i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2, k_1 \in SR, k_2 \in SR, k_1 < k_2 \quad (31)$$

$$(1 - p_{i1}) \times (1 - g_{i2}) \times g_{i1} \times (y_{i2jk2} - z_{i1jk1} - D_{i1}) \geq M(f_{i1jk1} + x_{i2jk2} - 2),$$

$$i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2, k_1 \in SR, k_2 \in SR, k_1 < k_2 \quad (32)$$

$$p_{i1} \times (1 - g_{i2}) \times g_{i1} \times (y_{i2jk2} - z_{i1jk1} - c_{i1}) \geq M(f_{i1jk1} + x_{i2jk2} - 2),$$

$$i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2, k_1 \in SR, k_2 \in SR, k_1 < k_2 \quad (33)$$

$$(1 - g_{i1}) \times g_{i2} \times (u_{i2jk2} - z_{i1jk1} - c_{i1}) \geq M(x_{i1jk1} + s_{i2jk2} - 2),$$

$$i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2, k_1 \in SR, k_2 \in SR, k_1 < k_2 \quad (34)$$

$$(1 - g_{i2}) \times g_{i1} \times (y_{i2jk2} - o_{i1jk1} - c_{i1}) \geq M(s_{i1jk1} + x_{i2jk2} - 2),$$

$$i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2, k_1 \in SR, k_2 \in SR, k_1 < k_2 \quad (35)$$

$$0 \leq y_{ijk} \bmod 2T \leq T - c_i \quad (36)$$

$$0 \leq (t_{ijk} \bmod 2T) \times p_i \leq (T - c_i) \times p_i \quad (37)$$

$$0 \leq (t_{ijk} \bmod 2T) \times (1 - p_i) \leq (1 - p_i) \times T \quad (38)$$

$$0 \leq u_{ijk} \bmod 2T \leq T - c_i \quad (39)$$

$$T \leq z_{ijk} \bmod 2T \leq 2T - c_i \quad (40)$$

$$p_i T \leq (n_{ijk} \bmod 2T) \times p_i \leq (2T - c_i) \times p_i \quad (41)$$

$$(1 - p_i) T \leq (n_{ijk} \bmod 2T) \times (1 - p_i) \leq (2T - D_i) \times (1 - p_i) \quad (42)$$

$$T \leq o_{ijk} \bmod 2T \leq 2T - c_i \quad (43)$$

$$|\sum_j \sum_k y_{ijk} - \sum_j \sum_k y_{i2jk}| \geq H, i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (44)$$

$$|\sum_j \sum_k y_{ijk} - \sum_j \sum_k t_{i2jk}| \geq H, i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (45)$$

$$|\sum_j \sum_k t_{i1jk} - \sum_j \sum_k t_{i2jk}| \geq H, i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (46)$$

$$p_{i2} \times |\sum_j \sum_k t_{i1jk} - \sum_j \sum_k u_{i2jk}| \geq H \times p_{i2},$$

$$i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (47)$$

$$p_{i2} \times |\sum_j \sum_k y_{i1jk} - \sum_j \sum_k u_{i2jk}| \geq H \times p_{i2},$$

$$i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (48)$$

$$p_{i2} \times p_{i1} \times |\sum_j \sum_k u_{i1jk} - \sum_j \sum_k u_{i2jk}| \geq H \times p_{i2} \times p_{i1},$$

$$i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (49)$$

$$|\sum_j \sum_k z_{i1jk} - \sum_j \sum_k z_{i2jk}| \geq H, i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (50)$$

$$|\sum_j \sum_k z_{i1jk} - \sum_j \sum_k n_{i2jk}| \geq H, i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (51)$$

$$|\sum_j \sum_k z_{i1jk} - \sum_j \sum_k o_{i2jk}| \geq H, i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (52)$$

$$|\sum_j \sum_k n_{i1jk} - \sum_j \sum_k o_{i2jk}| \geq H, i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (53)$$

$$|\sum_j \sum_k n_{i1jk} - \sum_j \sum_k n_{i2jk}| \geq H, i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (54)$$

$$|\sum_j \sum_k o_{i1jk} - \sum_j \sum_k o_{i2jk}| \geq H, i_1 \in SV, i_2 \in SV, i_1 \neq i_2 \quad (55)$$

$$i \in SV, j \in SB, k \in SR \quad (56)$$

本文以船舶总在港时间最小为优化目标,一艘船舶的在港时间从船舶到港时刻开始计算,一直到船舶驶离航道。约束式(2)~(4)表示在每个泊位上同一顺序只能停靠一艘船;约束式(5)~(7)表示只有当船舶*i*以*k*次序靠*j*泊位时,才有船舶*i*的入港时间;约束式(8)~(10)表示只有当船舶*i*以*k*次序靠*j*泊位时,才有船舶*i*的离泊时间(进入航道);约束式(11)~(14)表示船舶的入港时间大于等于船舶的到港时间;约束式(15)~(18)表示船舶离港时间,入港时间和工作时间三者需要满足的关系,其中式(17)式表示*i*船移泊到港池内空泊位,式(18)表示*i*船返回锚地等待二次进港;约束式(19)~(21)表示每条船的停泊次数都为1次(移泊船舶为2次);约束式(22)~(24)表示船舶停泊需要满足泊位长度的限制;约束式(25)~(29)表示预定船舶的编号以及停泊位置,编号为4号、7号、15号的优先权船舶,目的泊位编号为2号、4号、7号;约束式(30)~(35)表示同一泊位上的船舶工作时间不

重叠,约束式(36)~(43)表示船舶进出港时间要在对应的进出港时段内进行,其中包括了港池内移泊和返回锚地等待的移泊作业方式;约束式(44)~(55)表示船舶在航道内进出需要满足安全航行时间间隔。

3 算法设计

鉴于问题属于 NP 难问题,本文针对问题特点设计了免疫遗传算法进行求解,加入了免疫算子,优

化了最终解;并设计了基因修复算子,用以确保解的有效性。

3.1 解的表示

依据船舶到港顺序对船舶编号,如图 2 所示,染色体共 3 层,第 1 层表示船舶编号,用 0 将泊位分隔。第 2 层表示移泊船舶的移泊目的泊位编号,此层染色体长度由预定船舶数量决定。第 3 层表示移泊到对应泊位的作业次序,0 代表此时无船,可以直接港池内移泊。

染色体编码											
第 1 层	2	5	4	0	1	3	7	0	6	8	9
泊位号	#1	#1	#1		#2	#2	#2		#3	#3	#3
船舶编号	2	5	4		1	3	7		6	8	9
第 2 层	2		3								
目的泊位	2		3								
第 3 层	1		3								
作业次序	1		3								

图 2 染色体编码

3.2 初始解的生成

基于模型中的约束,设计了如下的初始解生成策略。

STEP 1 初始化参数,生成染色体第 1 行。具体步骤如下。

步骤 1 计算第 1 行染色体中包含优先船舶泊位的各艘船舶的到港时间、进港时间以及离港时间。

步骤 2 对于每个泊位,若优先船舶到港时间大于紧前船舶进港时间并小于其离港时间,转到步骤 5;若优先船舶到港时间小于等于紧前船舶进港时间转到步骤 3;若优先船舶到港时间大于等于紧前船舶离港时间或者无紧前船舶,转到步骤 4。

步骤 3 将优先船舶与紧前船舶的位置互换,转到步骤 2。

步骤 4 重新随机生成第 1 层染色体并转到步骤 1。

步骤 5 保留此层染色体。

STEP 2 按照优先船舶到港顺序产生同样数量的移泊船舶,其移泊目标泊位在第 2 层从左至右

排列,按照泊位长度限制随机生成移泊目的泊位序号,至此生成了第 2 层染色体。

STEP 3 根据上两层染色体计算出是否可以在此泊位港池内移泊,若可以则为 0,否则按照移泊船舶第 1 次完工时间随机生成在此泊位的后续作业顺序。

3.3 浓度概率和适应度函数的确定

在当前的抗体群中,将所有抗体按照浓度大小排列,统计出前 x 个抗体,并将其浓度概率都设定为 $1/n \times (1 - t/n)$,其余 $n - t$ 个抗体的浓度概率设定为 $1/n \times [1 + t^2/(n^2 - n \times t)]$;其中 n 为种群规模, $1 < t < n$,所有抗体浓度概率之和为 1。

本文的目标函数为船舶总在港时间,目标函数越小解就越优良,而且目标函数数值本身过大,故本文适应度函数为 $f(x) = c_{\max} - g(x)$, $g(x) < c_{\max}$; $f(x) = 0$, $g(x) > c_{\max}$ 。其中 $g(x)$ 为目标函数, $c_{\max}$ 为本代个体解得目标函数的最大值。这样扩大了个体间的差异,寻优能力和收敛速度均得到提升。

3.4 抗体之间的促进与抑制

本文的选择概率由适应度概率和浓度概率共同确定,即 $p = p_f \times \gamma + (1 - \gamma) \times p_t$ 。其中, p_f 为抗体的适应度概率, p_t 为抗体的浓度概率, $0 < \gamma < 1$, $0 < p_f, p_t < 1$ 。这样构成的选择概率既筛选了优秀的后代,又保留了种群的多样性。

3.5 选择过程

本文的轮盘赌选择过程如下。
步骤 1 计算个体的选择概率,将其进行从小到大的排列。

步骤 2 按照数组的排列顺序将其累加,第 n 个数变成前 n 项之和。

步骤 3 生成一个 $0 \sim 1$ 之间的随机数,计算其所落到的区间中。找到这个区间对应的个体,重复多次,直到产生了一个数量相同的种群。

步骤 4 按照交叉概率对新种群进行交叉操作,每一个个体与下一个个体概率交叉,直至所有个体遍历完毕。

3.6 交叉和变异过程

交叉与变异过程如下。
步骤 1 生成一个 $0 \sim 1$ 的随机数,检测该数是否小于交叉概率,若是则转到步骤 2,否则转到步骤 3。
步骤 2 若该数小于变异概率,则转到步骤 5,否则转到步骤 4。
步骤 3 保持这条染色体不变,保留到下一代。
步骤 4 对此条染色体与相邻的下一条染色体进行 OX 交叉,将新生成的染色体保存至下一代。
步骤 5 对此条染色体进行变异操作,具体操

作是:任选一不需要移泊的非预定船舶,将其随机分配到其他符合泊位长度限制的泊位上。

步骤 6 对新生成的染色体进行基因修复。

3.7 基因修复算子

在交叉变异生成新个体时,会出现船长超过泊位长度的情况,采取以下的修复方式。

步骤 1 依次检查个体,对于第 1 层的基因如果某个船舶长度大于泊位长度转到步骤 2,否则转到步骤 3。

步骤 2 在更大的泊位中随机选取一个基因与之交换位置。转到步骤 1。

步骤 3 输出新个体。

经过基因修复的个体,要符合本算法的生成策略,对新个体依照 3.1 节的方法来调整。

3.8 算法终止条件

若算法达到了最大循环次数,则终止运算输出最优解。

4 算例实验

4.1 算例描述

在一个单向航道单港池的散货港口中,拥有 9 个离散型泊位,其中 1 ~ 3 号泊位为小型泊位,4 ~ 6 号泊位为中型泊位,7 ~ 9 号泊位为大型泊位,按照船舶型号由小到大,卸载效率依次为 0.5 t/h、0.75 t/h、1.0 t/h,不同船舶进港航行时间在 1 ~ 1.5 h 之间,港池内移泊操作时间为 0.5 h,进出港时段为 3 h,调度周期为 48 h,抵港船舶信息见表 1。

表 1 船舶信息

船舶编号	抵港时刻 (min)	载货量(t)	船长(m)	是否拥有 使用优先权	目的 泊位编号
1	73	5	152	0	0
2	100	8	295	0	0
3	185	11	359	0	0
4	267	13	375	1	2
5	335	6	202	0	0
6	410	6.7	226	0	0
7	520	6	218	1	4

表 1 续

8	534	6	207	0	0
9	552	13	314	0	0
10	563	3	134	0	0
11	647	12	394	0	0
12	702	6	286	0	0
13	797	13	357	0	0
14	807	11	338	0	0
15	838	6	222	1	7
16	863	6.7	222	0	0
17	955	3	108	0	0
18	1 001	4	187	0	0
19	1 115	3.5	173	0	0
20	1 199	7.5	297	0	0

4.2 方案有效性验证

基于本文的模型以及算法,应用 Python3.7 软件对本文问题进行编程实现,种群数量设定为 300,迭代次数 500 次,交叉概率 0.6,变异概率 0.01,

本文的实验都运行在 2.3 GHz Intel(R) Core(TM) 和 4 GB 内存的计算机上,船舶总在港时间为 20 087 min,结果如图 3 所示。

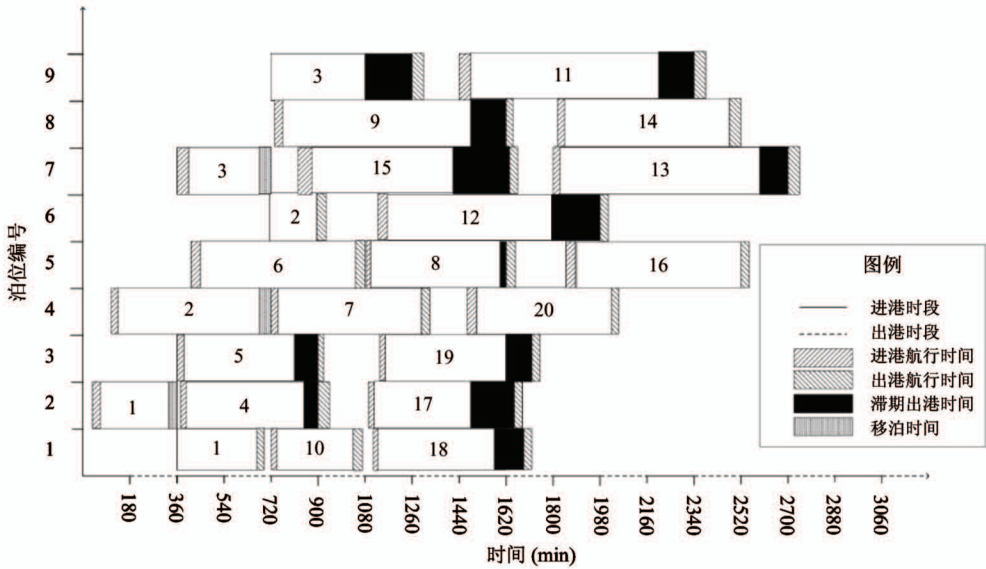


图 3 本文方案

在港口的实际操作中,采用先到先服务的操作准则,船舶总在港时间为 20 690 min,泊位分配方案如图 4 所示。对比图 3 和图 4 可以看出,本文的解决方案对局部船舶调度具有更好的灵活性,减少了船舶总在港时间,说明了本文方案的有效性。

4.3 算法有效性验证

将本文中模型约束简化,使模型转化为线性模

型,使用 CPLEX 求得精确解,再与遗传算法的计算结果进行对比,CPLEX 运行时间上限设置为 1 h,各组对比结果见表 2。

从运算结果来看,在小规模算例时,本文算法的结果与 CPLEX 的计算结果偏差不超过 6%;且本文算法在求解大规模算例时依然能在 5 min 内给出运算结果。

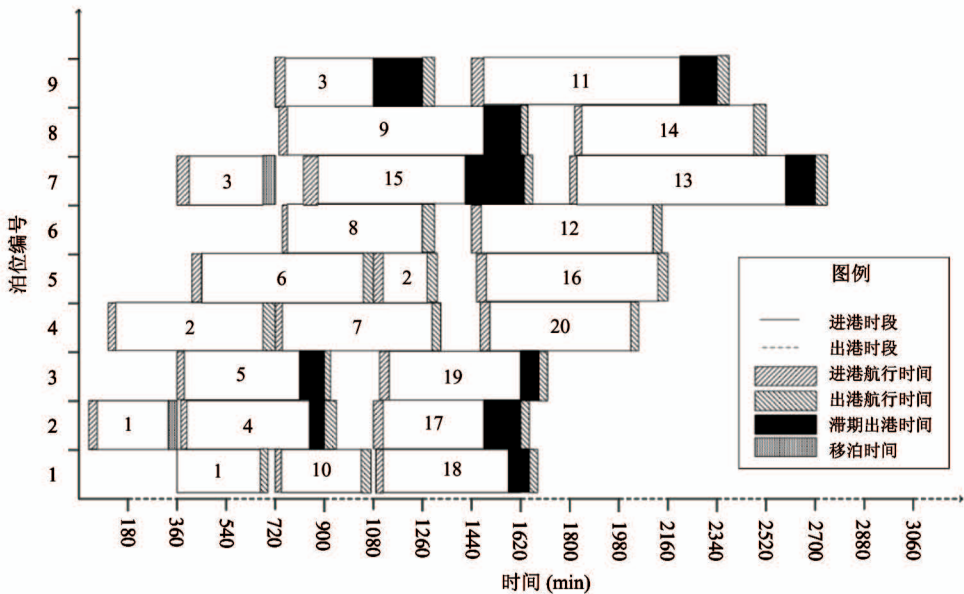


图 4 港口实际作业方案

表 2 算法对比结果

规模	船舶数量/ 拥有优先权 的船舶数量	泊位 数量	免疫遗传算法		CPLEX		目标函数 差值
			目标函数	运行时间	目标函数	运行时间	GAP
			(min)	(s)	(s)	(s)	
小	5/1	2	4 257	35	4 257	32	0.00%
小	7/1	3	6 240	68	5 890	159	5.60%
中	9/1	4	8 625	97	8 369	340	2.97%
中	12/2	6	9 787	124	9 354	942	4.63%
中	15/2	7	13 654	156	12 901	2 645	5.51%
大	18/3	8	17 562	201	-	-	-
大	20/3	9	20 087	240	-	-	-
大	23/4	11	24 594	268	-	-	-

4.4 算法优越性分析

为验证本文算法的优越性,采用蚁群算法与模拟退火算法对本文问题进行求解,不同规模的运算结果及差值见表 3 和表 4。

由表 3 和表 4 可知,在求解小规模算例时,3 种算法求解结果差异不大,但在求解中大规模算例时,本文算法表现较好适用于求解中大规模的问题。

4.5 灵敏度分析

本文对进出港时段长度以及拥有泊位优先权的船舶数量 2 个方面进行灵敏度分析。

进出港时段长度灵敏度分析。船舶进出港耗时最大为 45 min,进出港时段长度设为 100 ~ 200 min

之间。每组进行 3 次实验,结果取平均值。结果见表 5。

由表 5 中的结果可知,当船舶数量大于 12 时,进出港时段设定为 160 min 左右为最优;当船舶数量为 9 左右时,进出港时段设定为 140 min 左右为最优。

拥有优先权船舶数量灵敏度分析。在本文问题的基础上,把带有使用优先权的船舶的数量增加为 5 和 7,分别设定为情况 2 和情况 3。程序运行结果如表 6 所示。

由表中结果可知,船舶总在港时间随着拥有优先权的船舶数量的增加而增加。

表 3 算法对比结果

规模	船舶数量/ 拥有优先权的 船舶数量	泊位 数量	免疫遗传算法		蚁群算法		目标函数 差值
			目标函数 (min)	运行时间 (s)	目标函数 (min)	运行时间 (s)	GAP
小	5/1	2	4 257	35	4 320	5	0.01%
小	7/1	3	6 240	68	6 375	8	2.16%
中	9/1	4	8 625	97	9 321	11	8.07%
中	12/2	6	9 787	124	11 647	16	19.00%
中	15/2	7	13 654	156	14 994	26	9.81%
大	18/3	8	17 562	201	22 070	35	25.62%
大	20/3	9	20 087	240	24 659	49	22.76%
大	23/4	11	24 594	268	30 563	68	24.27%

表 4 算法对比结果

规模	船舶数量/ 拥有优先权的 船舶数量	泊位 数量	免疫遗传算法		模拟退火算法		目标函数 差值
			目标函数 (min)	运行时间 (s)	目标函数 (min)	运行时间 (s)	GAP
小	5/1	2	4 257	35	4 257	10	0.00%
小	7/1	3	6 240	68	6 498	15	4.13%
中	9/1	4	8 625	97	8 964	29	3.93%
中	12/2	6	9 787	124	9 865	61	0.80%
中	15/2	7	13 654	156	15 238	98	11.60%
大	18/3	8	17 562	201	20 754	120	18.18%
大	20/3	9	20 087	240	22 659	167	12.80%
大	23/4	11	24 594	268	25 780	196	4.82%

表 5 进出港时段长度灵敏度分析

船舶数量/ 预定船舶数量	100 min	120 min	140 min	160 min	180 min	200 min
9/1	9 290	8 610	8 006	8 260	8 654	9 526
12/2	11 562	10 396	9 963	9 523	10 169	12 150
15/2	17 026	14 770	13 569	12 369	13 823	15 236
18/3	23 698	20 357	18 569	17 023	17 912	19 057
20/3	27 541	24 521	22 369	18 236	20 103	22 056
23/4	30 269	26 598	23 687	21 569	24 601	25 960

表 6 拥有优先权的船舶数量灵敏度分析

实验次数	情况 1(min)	情况 2(min)	情况 3(min)
1	20 087	21 456	23 097
2	19 971	21 687	23 584
3	20 012	22 047	23 097
4	20 297	21 943	24 096
5	19 952	21 456	23 221
6	20 087	21 943	23 097

表 6 续

7	19 971	22 098	23 097
8	21 016	21 687	23 951
9	20 012	22 143	23 658
10	20 212	21 456	23 584

通过对比 2 次实验结果可发现,不论是调整进出港时段长度还是调整特殊船舶的数量,目标函数

都有明显变化,但前者的影响更显著。

5 结 论

本文在散货码头泊位分配和船舶调度集成优化问题的基础上,重点考虑了由于使用优先权而产生的移泊问题,兼顾了船舶进出港和靠离泊的作业规则,为移泊船舶提供了2种移泊方案,最终给出了船舶的泊位分配方案、船舶进出港次序以及船舶的移泊方案,减少了船舶总在港时间,表明通过合理的调度可有效地降低船舶泊位优先权的影响。

结合问题特点,设计了多层编码的免疫遗传算法,为类似问题的解决提供了思路。

通过敏感性分析发现,进出港时段长度较拥有泊位优先权的船舶数量对所有船舶总在港时间影响更大;在港口实际作业中,宜按照每天到港船舶的数量,动态调整进出港时段长度,再依据港口的实际情况调整拥有泊位优先权船舶的航线或错开港口作业高峰期。

但是本文没有考虑到潮汐和干扰事件对于船舶的影响,并且只是在单向航道中研究,未来的研究可以在双向航道或者复式航道中考虑干扰事件对本文问题的影响。

参考文献

[1] 孙少文,杨斌,胡志华. 潮汐影响下的港口离散泊位

分配问题研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(4):486-492

[2] 官培堃,毕明彦,陈林等. 遗传算法在码头泊位调度的研究与应用[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊),2016(9):179-180

[3] 刘慧莲,曹瑾鑫. 不确定性集装箱码头泊位与岸桥分配问题[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版),2016,47(3):312-320

[4] Schepler X, Absi N, Feillet D, et al. The stochastic discrete berth allocation problem[J]. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2019,8(4):363-369

[5] Wawrzyniak J, Drozdowski M, Sanlaville E. Selecting algorithms for large berth allocation problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019,283(3):844-862

[6] 柴佳祺,李锋,宓为建,等. 基于启发式算法的散货码头排船问题研究[J]. 中国工程机械学报,2015,13(1):22-28

[7] Lalla-Ruiz E, Shi X N, Voß S. The waterway ship scheduling problem[J]. *Transportation Research Part D*, 2016,60:191-209

[8] 郑红星,刘保利,张润,等. 考虑减载移泊的散货港口船舶调度优化[J]. 交通运输工程学报,2018,18(5):152-164

[9] 郑红星,刘保利,王泽浩,等. 考虑潮汐的多港池港口船舶调度优化[J]. 系统工程理论与实践,2018,38(10):2638-2651

[10] 郑红星,徐海栋,刘保利,等. 单向航道船舶进港次序与泊位分配协同优化[J]. 运筹与管理,2017,26(9):37-45

[11] Zhang X Y, Lin J, Guo Z J, et al. Vessel transportation scheduling optimization based on channel-berth coordination[J]. *Ocean Engineering*, 2016,112:145-152

Berth allocation and ship scheduling integrated optimization considering the priority of berth in use

Niu Meng, Wang Zhongyi, Li Yajun, Zheng Hongxing

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract

Berth allocation and ship scheduling affect each other, and their collaborative optimization is the key to improve the efficiency of sea-side operations. For discrete berth bulk cargo port with one-way channel and single-harbor basin, plans for integration problem of ship scheduling and berth allocation are studied. Considering the time and spatial constraints of ships in/outbound harbor time and berthing and departing, the realistic limits such as berth shifting problem caused by the priority of ship berthing are focused on, an integrated optimization model is built to minimize the total time of the vessel settling in port. An immune genetic algorithm is designed to solve the model. Also the schemes of berth allocation, berth shifting and ships in/outbound harbor scheduling during the planning period are given. The validity of the scheme and the algorithm is verified by the experiment, and the influence of ships in/outbound harbor duration length and the number of ships with priority on the integrated scheduling scheme is analyzed, which can provide decision support for the actual operation of the port.

Key words: priority of berth in use, berth shifting, bulk cargo port, ship scheduling, berth allocation