

区域航运网络上的不定期船舶调度优化^①

郑红星^② 任亚群^③ 王泉慧

(大连海事大学交通运输工程学院 大连 116026)

摘 要 为降低在区域航运网络上提供不定期货运服务的航运企业运营成本,本文研究了不定期船舶的调度优化。以区域内不同港口间货运需求已知为前提,重点考虑泊位时间窗和每个港口可装可卸的实际情况,兼顾港口的货物服务时间窗和船舶容量等现实约束,以计划期内所有调度船舶的总运营成本最小为目标,构建了一个整数规划模型,设计了嵌入禁忌搜索规则的遗传算法对模型进行求解,给出了所有船舶的挂靠港次序和运输的货物。通过数值实验,将改进遗传算法与 CPLEX 和传统遗传算法对比,验证了模型和算法的有效性。结果表明,考虑泊位时间窗和港口可装可卸能够降低运营成本。

关键词 水路运输, 船舶调度, 改进遗传算法, 不定期船舶, 泊位时间窗

0 引 言

海运是国际贸易和世界经济的支柱,占全球贸易量的 80% 左右和全球贸易额的 70% 以上^[1]。随着全球经济增长,船舶运输能力不断增加,船舶大型化趋势愈加明显,航运企业不断寻求实现规模经济效益,而合理的船舶调度可以充分利用船舶舱容并减少运营成本,对提高航运企业竞争力尤为重要。不定期运输在海上运输中市场广泛,考虑其多个港口、多种货物、船期短的运营特点,研究科学的不定期船舶调度方法是当前的热点问题。

不定期运输船舶没有固定航线和船期表,影响航运企业盈利的一个关键因素就是航运周期,航运周期包括海上航行时间和船舶在港时间^[2]。由于港口要为很多航运企业和船舶提供服务,而泊位数量有限,故不能保证在船舶到达时刻立即提供服务^[3],因此航运企业制定船舶调度计划时需考虑泊位时间限制,使船舶在泊位可用时间窗到达,以减少船舶等泊时间。

固定计划期内的不定期船舶调度问题,不仅需要满足货运需求以及在调度过程中不超过船舶载重限制的要求,还需考虑在同一港口装、卸货的服务时限要求和泊位时间限制,其中港口对货物的服务时间限制可能包含不同的泊位空闲时间段,符合不定期船舶运输的实际情况。

目前很多文献对不定期船舶调度问题进行了深入研究,其中优化船队运营成本的文献如下: Pang 和 Liu^[4]考虑了货运需求和泊位时间限制,建立整数规划模型,设计了两阶段算法求解,但没有涉及货物的服务时间窗。丁一等人^[5]考虑了同一船型、只卸不装条件下,航行时间的不确定性和港口软时间窗,建立了考虑时间因素的数学模型,通过扫描法和禁忌搜索算法将问题分为两个阶段求解。Gelareh 和 Meng^[6]针对运输业务的短期调度问题,考虑了航线运输需求和航运服务的时间窗限制,将一个非线性混合整数规划模型线性化,并用 CPLEX 求解。Qiu^[7]提出了基于轴辐式网络的不定期船舶路径问题的模型,以满足货运需求为前提,以最小化固定成本、航行成本和港口费用为目标,设计了局部搜索的

① 国家自然科学基金(71473024)资助项目。
② 男,1971 年生,博士,副教授,博士生导师;研究方向:物流系统优化与仿真;E-mail: zhredstar@dlmu.edu.cn
③ 通信作者,E-mail: 2439154290@qq.com
(收稿日期:2018-08-24)

遗传算法和启发式算法求解。De 等人^[8]考虑了货运需求、船舶容量限制和港口时间窗限制,建立了混合整数非线性规划模型,设计了复合粒子搜索算法。

而以船队运营收益最大为目标的文献有:Lin 等人^[9]考虑了带有时间窗的装卸一体化问题,并满足货运需求和船舶载重限制,设计了一种适应性广泛的遗传算法。Andersson 等人^[10]在文献^[9]的基础上考虑了货物可分开装运,设计了分支定价方法求解。López-Ramos 等人^[11]考虑了泊位时间窗,假设已知船舶要装运的货物,建立混合整数线性规划模型并设计了启发式算法。Korsvik 等人^[12]考虑到不定期运输的合同货物和即期货物以及港口货物可以被不同船舶运输,并满足货运需求、船舶载重和港口时间窗限制,以船队的收益最大为目标,设计了大型邻域搜索启发式算法得到船舶的运输路线。Norstad 等人^[13]考虑了船舶载重限制、货物服务时间窗和船舶的可变航速,并满足合同货物和部分即期货物的运输需求,建立了混合整数非线性规划模型,并设计了启发式算法求解。

此外,Arnesen 等人^[2]考虑带有装卸一体化、港口时间窗和泊位吃水限制的旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)问题,以船舶的运营时间最短为目标,设计了基于动态规化的算法。Noshokaty 等人^[14]考虑到可装可卸、船舶载重限制和不定期运输船舶对时间的敏感性,以船舶日均毛利润为目标,设计了启发式算法将模型转换为线性形式,利用改进的分制定界法求解。Psaraftis^[15]分析了近年来针对船舶调度问题不同角度的研究特点,提出了更加接近实际应用的改进方法以及未来研究方向。

综上所述,不定期船舶调度的大多数文献侧重考虑货运需求、船舶容量和港口对货物的服务期限,以运营成本最低或收益最大为优化目标,忽略了中间挂靠港口可装可卸的实情,很少考虑泊位时间窗的现实约束。而在不定期集装箱船运输中,船舶在泊位可用时间窗内到达不仅可以减少船舶在港等待时间,缩短船舶离港时间,还可以避免船舶航行过程中为满足货物的服务时间窗而提速,进而减少运营成本。而在每个挂靠港的实际装卸情况可以实时改变船舶可用舱容,因此在实际运营过程中需重点关

注船舶可装可卸的现实条件,满足船舶载重限制要求。

有鉴于此,本文在已有研究的基础上,针对一家运营区域航运网络上不定期运输的航运企业,以满足货运需求为前提,重点考虑区域内每个港口的实际装卸情况和泊位可用时间窗,兼顾每个港口的货物服务时间期限和船舶容量等现实约束,建立了船舶调度优化模型,通过对船舶调度方案进行优化以减少航运企业运营成本。

1 问题描述

本文问题可以描述为:在预知计划期内参与调度的船舶数量、船舶容量、经济航速和区域网络上的港口距离以及货运需求等相关信息后,重点考虑泊位可用时间窗和在港口可装可卸的实际情况,兼顾货物在港口的服务时限和航行过程中要始终满足船舶容量等现实约束,研究在计划期内不定期船舶调度优化方案,即每艘船舶的挂靠港顺序和运送的货物,实现船舶总运营成本最低的目标。

如图 1 所示,假设有 3 艘船和 8 个港口,不同线型的闭环代表不同船舶的路径。以 V1 船为例,图 1 表明了船舶航行的路径和在每个港口装卸的货物:港口 1(装载 A、B)—港口 2(卸载 B,装载 C)—港口 4(装载 D、E,卸载 B)—港口 6(卸载 D、C)—港口 1(卸载 E)。

2 数学模型

2.1 模型假设

根据不定期船舶运输特点,做如下假设:

- (1) i 港到 j 港的货物全部装载在一艘船上,即不分开装运。
- (2) 船舶满足港口和航道限制的条件。
- (3) 不考虑其他自然条件因素的影响。
- (4) 不考虑固定成本,只考虑变动运营成本(燃油费、港口码头使用费)。

2.2 符号说明

I 是港口集合; K 为船舶集合; 决策变量 x_{ki} 是船

k 在 i 港挂靠则 $x_{ki} = 1$, 否则 $x_{ki} = 0$; y_{kij} 是船 k 访问 i 港后直接访问 j 港则 $y_{kij} = 1$, 否则 $y_{kij} = 0$; o_{kij} 是 i 港到 j 港的货物装在 k 船上则 $o_{kij} = 1$ 否则 $o_{kij} = 0$;

y_{koj} 为 k 船最先挂靠 j 港, 且最后返回 j 港则 $y_{koj} = 1$, 否则 $y_{koj} = 0$ 。其中决策变量关系如图 2 所示。

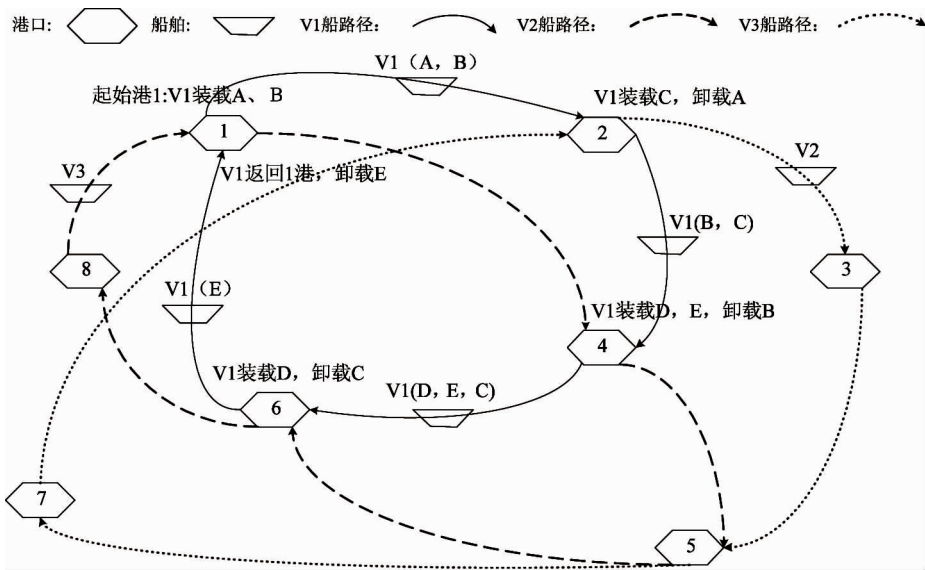


图 1 航运网络图

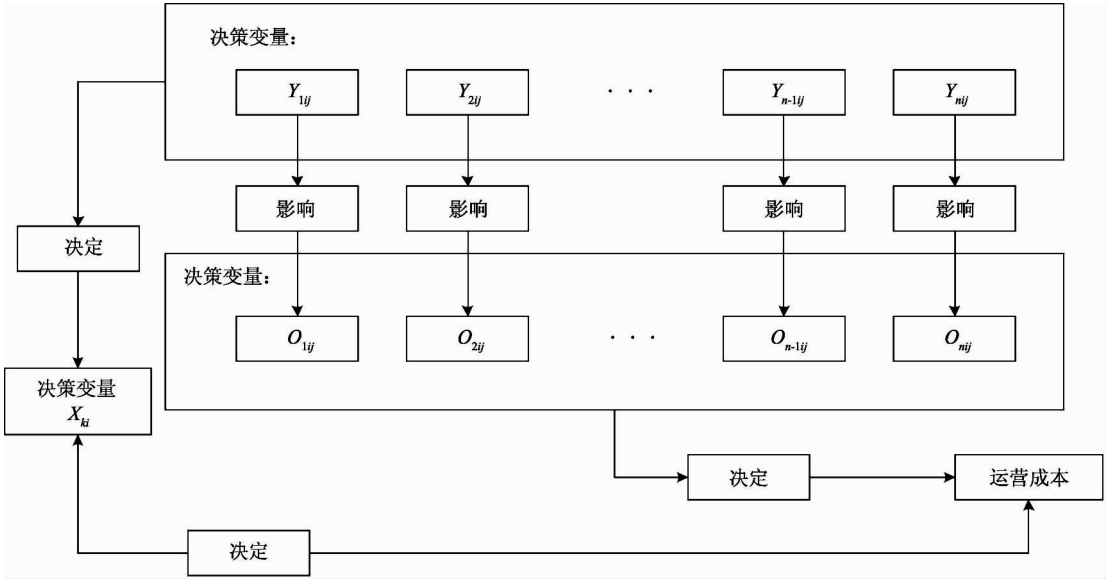


图 2 变量关系

2.3 目标函数

本文以总运营成本最小为目标函数如约束式(1)所示:

$$\begin{aligned} \text{Min} Z = & \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} f_k \times \frac{d_{ij}}{v_k} \times y_{kij} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} F_i \\ & \times x_{ki} + \sum_{k \in K} (P_{EK} \times \sum_{i \in I} W_{ki} + P_{LK} \times \sum_{i \in I} D_{ki}) \end{aligned}$$

$$+ \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} BT_{ki} \times B_{ki} \tag{1}$$

其中, f_k 为 k 船单位时间的运输成本, d_{ij} 是 i 与 j 港的距离, v_k 为 k 船的经济航速, P_{EK} 为船 k 在港口允许最早开始作业时间之前到达的单位时间等待成本, P_{LK} 为船 k 在港口允许最迟开始作业时间之后到达的单位时间惩罚成本, W_{ki} 是船 k 在港口等待开

始作业的时间, D_{ki} 是船 k 在 i 港的延迟到达时间; BT_{ki} 为船 k 在 i 港的等泊时间, B_{ki} 是船 k 在 i 港的单位时间等泊成本。式(1)指带有软时间窗约束的船舶总运营成本最小,其第1项代表航行的燃油成本,第2项代表挂靠港口的码头使用费,第3项代表船舶在港口的货物服务时间窗之外到达的等待成本和惩罚成本之和,第4项代表船舶等泊成本。由于所有货物都必须被运输,故本文没有考虑货物装卸费。在实际调度中,航运企业会选择在港口等待或延迟到达港口运输货物,使船舶调度方案可行^[15]。

2.4 网络约束

船舶航行路线网络需满足约束式(2)~(4):

$$\sum_{k \in K} x_{ki} \geq 1, \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in I} y_{kij} = 1, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} y_{kij} - \sum_{i \in I} y_{kji} = 0, \forall k \in K, j \in I \quad (4)$$

其中,式(2)指每个港口至少有一艘船挂靠,式(3)指每艘船挂靠的起始港和终点港只有一个,式(4)指船舶驶入某一港口就必须从此港口驶出。

2.5 航行时间限制

船舶航行时间需满足约束式(5)~(8):

$$t1_{kj} \geq \sum_{i \in I} (t2_{ki} + T_{kij}) \times y_{kij}, \forall j \in I, \forall k \in K \quad (5)$$

$$T1_{ki} \geq t1_{ki} + M1_i \times x_{ki}, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (6)$$

$$T2_{ki} \leq t2_{ki}, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (7)$$

$$T2_{ki} = T1_{ki} + \frac{\sum_{j \in I} l_{ijk} + \sum_{j \in I} l_{jik}}{h_i}, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (8)$$

其中, $t1_{ki}$ 为 k 船到达 i 港的时刻, $t2_{ki}$ 为 k 船离开 i 港的时刻, T_{kij} 为船 k 从 i 港到 j 港的航行时间 ($T_{kij} = \frac{d_{ij}}{v_k}$), $T1_{ki}$ 为 k 船在 i 港开始作业时刻, $T2_{ki}$ 为 k 船在 i 港结束作业时刻, l_{ijk} 是 k 船运输的起始港为 i 且终点港为 j 的货物货量, h_i 是 i 港装卸速度。式(5)为船舶抵达港口的时间计算;式(6)表示船舶开始作业时间应晚于船舶到港时间,其中 $M1_i = \max\{0, ET_i - t1_{ki}\}$, 允许船舶在到达港口后等待直到港口的货物服务时间窗的最早开始时间;式(7)

表示船舶结束作业时间应早于船舶离港时间;式(8)表示船舶结束作业时间等于开始作业时间和装卸货物时间之和。

2.6 货物服务时间限制

船舶在港作业时间需满足货物服务时间窗约束式(9)~(10):

$$T1_{ki} \geq ET_i \times x_{ki}, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (9)$$

$$T1_{ki} \leq (ST_i + T_i) \times x_{ki}, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (10)$$

其中, $[ET_i, ST_i]$ 为货物服务时间窗, ET_i 为 i 港允许最早开始作业时间, ST_i 为 i 港允许最迟开始作业时间。式(9)、(10)指船舶作业时间服从港口的货物服务时间窗限制,其中 T_i 代表在 i 港允许船舶延迟的最长时间。

2.7 泊位时间限制

船舶靠泊作业时间需满足泊位时间窗约束式(11)~(14):

$$T1_{ki} \geq t1_{ki} + M2_i \times z_{ki}^n, \quad \forall k \in K, \forall i \in I, \forall n \in N \quad (11)$$

$$e_i^n \leq T1_{ki} + M \times (1 - z_{ki}^n), \quad \forall n \in N, \forall i \in I, \forall k \in K \quad (12)$$

$$T2_{ki} \leq l_i^n + M \times (1 - z_{ki}^n), \quad \forall n \in N, \forall i \in I, \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} z_{ki}^n \leq 1, \forall n \in N, \forall i \in I \quad (14)$$

其中, z_{ki}^n 是 k 船在 i 港的第 n 个泊位时间窗作业则 $z_{ki}^n = 1$, 否则 $z_{ki}^n = 0$ 。 $[e_i^n, l_i^n]$ 是 i 港的第 n 个泊位时间窗, $n \in N$; M 是充分大的正数。式(11)、(12)、(13)指船舶在港口作业时间需满足港口的泊位时间窗设置,其中 $M2_i = \max\{0, e_i^n - t1_{ki}\}$ 代表允许船舶在港口等待泊位挂靠;式(14)表示港口的某一个泊位时间窗只能服务一艘船。

2.8 货运需求限制

完成货物运输要求需满足约束式(15)~(17):

$$D_{ij} \times \sum_{k \in K} m_{ijk} \geq D_{ij}, \forall i, j \in I \quad (15)$$

$$l_{ijk} = D_{ij} \times o_{kij}, \forall k \in K, \forall i, j \in I \quad (16)$$

$$D_{ij} \times \sum_{k \in K} o_{kij} = D_{ij}, \forall i, j \in I \quad (17)$$

其中, D_{ij} 是 i 到 j 港的货运需求; m_{ijk} 是 k 船先挂靠 i 港后直接或间接挂靠 j 港, 则 $m_{ijk} = 1$, 否则

$m_{ijk} = 0$; l_{ijk} 为 k 船运输的起始港为 i 且终点港为 j 的货物货量; o_{kij} 为 i 港到 j 港的货物装在 k 船上则 $o_{kij} = 1$ 否则 $o_{kij} = 0$ 。式(15)指有货运需求的航段至少被挂靠一次,式(16)指船舶装载的货物满足两港之间货物需求,式(17)指 i 港到 j 港的货物装在一条船上。

2.9 载重限制

船舶载重限制需满足约束式(18):

$$\sum_{q \in I} D_{qj} \times m_{qjk} \times o_{kqj} + \sum_{q \in I} D_{iq} \times m_{jqk} \times o_{kqi} \leq M_k + M \times (1 - y_{kij}), \forall k \in K, \forall i, j \in I \quad (18)$$

将约束式(18)线性化:

$$\sum_{q \in I} D_{qj} \times [(m_{qjk} - 1) + o_{kqj}] + \sum_{q \in I} D_{iq} \times [(m_{jqk} - 1) + o_{kqi}] \leq M_k + M \times (1 - y_{kij}), \forall k \in K, \forall i, j \in I$$

其中, M_k 为船 k 的装载量,式(18)代表船舶装载的货物要满足船舶的载重量限制。

变量约束:

$$m_{ijk} \geq y_{ijk}, \forall i, j \in I, \forall k \in K \quad (19)$$

$$m_{ijk} \geq x_{ki}, \forall i, j \in I, \forall k \in K \quad (20)$$

$$m_{ijk} \geq x_{kj}, \forall i, j \in I, \forall k \in K \quad (21)$$

$$x_{ki}, y_{ijk}, m_{ijk}, o_{kij}, z_{hi}^n \in \{0, 1\} \quad (22)$$

式(19)、(20)、(21)表示 m_{kij} 和 y_{kij} 、 x_{ki} 、 x_{kj} 的关系,式(22)表示变量取值范围。

3 算法设计

船舶调度问题属于 NP-hard 问题,随着问题规模增大,很难在有效时间内求出最优解。在求解本文模型时,以遗传算法为基础,融入了禁忌搜索规则,针对每代种群的最优解产生邻域解,提升了算法的局部搜索能力,算法流程图如图3所示。

3.1 染色体编码

将船舶挂靠的港口序列组合,不同船舶挂靠港之间用0分割,例如染色体编码[0132104254037623]。将 i 港到 j 港的货物装载在第一次出现航段 $i \sim j$ 的船舶上,船舶的编号根据载重量由大到小进行排列。

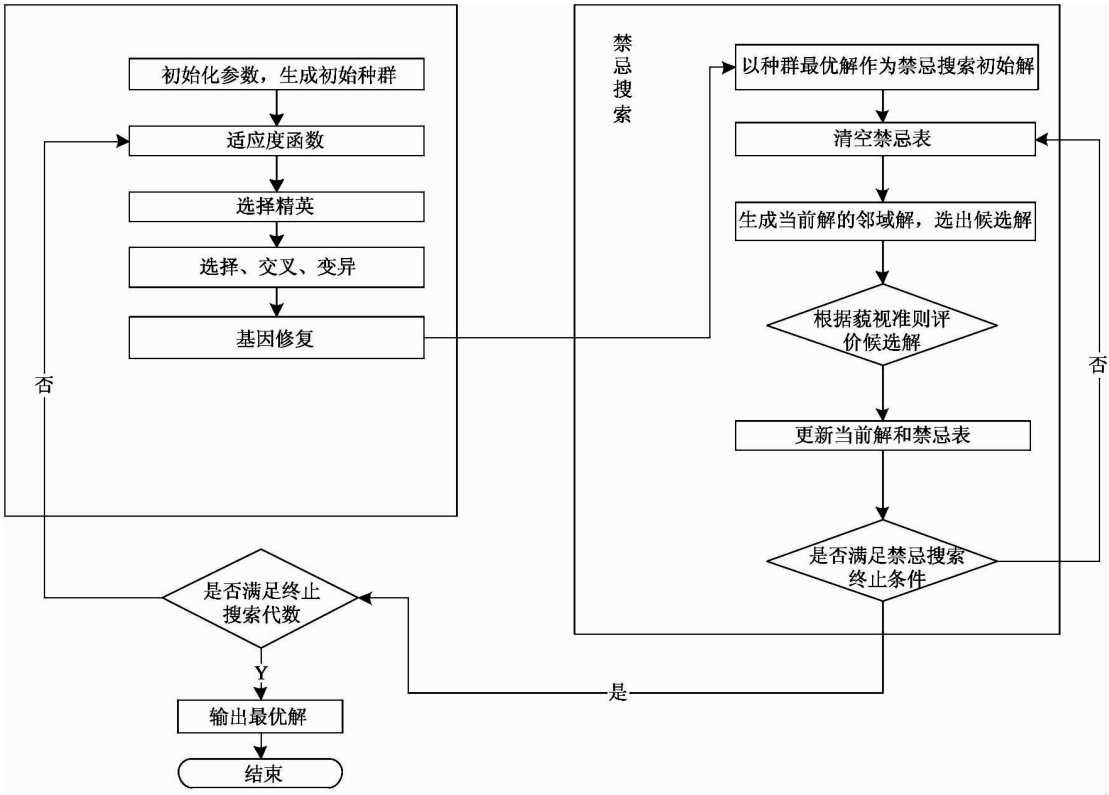


图3 算法流程图

3.2 种群初始化

随机产生 x 个初始解,检查每组解是否满足港口间货运需求和船舶载重限制,如不满足,则继续生成新的解直到满足条件为止。

3.3 适应度函数

选择目标函数的倒数作为适应度函数。

3.4 选择精英

选取排名在前 50% 的适应度值对应的染色体,将其直接作为下一代种群。

3.5 选择父代,交叉操作

采用轮盘赌的方式选择 50% 染色体作为父代染色体,将父代染色体中两条不同染色体作为一对,例如第一条染色体的编码为[0132103243021320],第二条染色体的编码为[0213203143042340],假设随机生成的交叉点常数为 2,则交叉产生的子代染色体分别为 [0132103143021320] 和 [0213203243042340]。

重复上述操作,产生的子代染色体达到种群数量的 50% ,与之前选择的排名靠前的 50% 染色体组成下一代种群。

3.6 变异操作

以固定变异率在子代种群中随机选择染色体,选择一个非 0 位置并将其改变为一个港口编号,若此编号和其他港口编号重复则继续生成直到不重复为止。

3.7 基因修复

检查船舶的挂靠港序列,如果某一港口既没有装货任务又没有卸货任务,则把该港编号从基因序列中删除。

3.8 禁忌搜索规则

步骤 1 在每一代种群中选择最优解作为当前解。

步骤 2 设置禁忌表为空,利用邻域函数为当前解产生若干邻域解并将其作为候选解,计算邻域解的适应度值。

步骤 3 根据藐视规则评价候选解,更新当前解和禁忌表。

为加快算法收敛速度,避免遗传算法的早熟现象,设置禁忌搜索的重复代数随遗传算法迭代代数的增加而增加。

3.9 终止条件

新的子代种群产生完毕之后,重复 3.3 ~ 3.8 节所述操作。终止规则就是设定最大的遗传代数 M ,当迭代到 M 代时停止运行。

4 算例实验

4.1 算例描述

某航运企业有 8 艘船,船舶装载量在 20 ~ 40 万吨之间。航运网络上有 15 个港口,港口的主要数据如表 1 ~ 4 所示。

表 1 港口间距离(海里)

港口	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	180	120	150	200	100	180	500	800	200	600	180	700	120	250
2	180	0	180	200	120	230	240	180	600	120	200	240	500	120	280
3	120	180	0	400	120	180	100	300	600	180	120	280	300	400	800
4	150	200	400	0	120	140	180	120	620	840	420	300	220	180	180
5	200	120	120	120	0	120	180	200	300	500	200	320	100	320	420
6	100	230	180	140	120	0	170	180	380	200	540	200	300	120	160
7	180	240	100	180	180	170	0	200	720	210	100	320	420	500	180
8	500	180	300	120	200	180	200	0	320	220	400	120	280	560	160
9	800	600	600	620	300	380	720	320	0	120	180	260	200	240	300
10	200	120	180	840	500	200	210	220	120	0	380	260	180	120	380
11	600	200	120	420	200	540	100	400	180	380	0	200	140	160	260
12	180	240	280	300	320	200	320	120	260	260	200	0	520	180	220
13	700	500	300	220	100	300	420	280	200	180	140	520	0	240	300
14	120	120	400	180	320	120	500	560	240	120	160	180	240	0	320
15	250	280	800	180	420	160	180	160	300	380	260	220	300	320	0

表 2 港口间运量需求(万吨)

港口	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	2.1	1.5	0	0	0	0	0	1.2	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0
3	0	1.8	0	0.8	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0	1.5
4	0	0	1	0	0	0	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0.6
5	0	0	0	1.1	0	0.6	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
6	1.5	0	0	0	1.2	0	0	0	1	0	0	0	0	2.3	0
7	0	0.6	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	1.2	0	0	0
8	0	0	0	0.5	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	1.2	0
9	0.8	0	0.8	0	0	0	0	1.4	0	0	0	0	0	0	1.1
10	2.2	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	1.7	0	0	0
11	0.8	0	0	0	2.6	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0
12	0	0.5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13	1.6	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	0	1.5	0	0	0	0	1.3	0	0	0	0.9	0	0	0	0
15	0.8	0	0	0	1.2	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0

表 3 船舶装载量(万吨)

船舶	1	2	3	4	5	6	7	8
载重吨	40	30	30	30	20	20	20	20

表 4 港口数据

港口	泊位时间窗(h)			港口时间窗(h)	港口码头使用费(¥)
	1	2	3		
1	(0,168)	(0,0)	(0,168)	0 – 80	2000
2	(0,168)	(0,0)	(0,168)	80 – 160	3000
3	(0,168)	(0,168)	(0,0)	60 – 140	4000
4	(0,24)	(30,54)	(72,92)	40 – 140	5000
5	(0,168)	(0,0)	(0,0)	70 – 150	2000
6	(0,24)	(30,54)	(72,92)	12 – 102	3000
7	(0,36)	(60,88)	(140,168)	20 – 160	1800
8	(12,36)	(48,70)	(72,94)	20 – 128	3000
9	(0,168)	(0,0)	(0,0)	0 – 90	2000
10	(0,168)	(0,0)	(0,0)	6 – 100	3500
11	(10,32)	(70,80)	(100,118)	18 – 92	2800
12	(24,48)	(60,78)	(120,148)	2 – 80	3000
13	(0,168)	(24,38)	(0,0)	0 – 90	3600
14	(0,168)	(0,0)	(0,0)	0 – 80	2800
15	(0,168)	(0,0)	(0,0)	50 – 128	2500

4.2 算例分析

根据本文模型、改进的遗传算法和相关数据,设定种群规模为 100,迭代次数为 100 次,交叉概率和变异概率分别为 0.5 和 0.05,重复运行 10 次。所有实验在 2.40 GHz Intel (R) Core (TM) i3-3110M

表 5 船舶调度方案	
船舶	路径
1	1-14-8-13-15-6-2-1
2	3-8-9-10-11-1-2-15-4-3
3	12-10-8-7-6-3-14-5-15-12
4	7-11-4-7
5	4-5-1-7-15-10-8-6-9-4
6	11-9-12-15-7-4-5-2-14-11
7	12-14-2-7-3-9-13-5-8-12
8	5-11-13-5

CPU 和4 GB内存的计算机上运行,采用 Matlab R2014a 编码。得到的最优方案如表 5 所示,最优方案收敛图如图 4 所示,该方案总目标值 $Z = 6\,587\,380$ 。

10 次运行结果如图 5 所示。

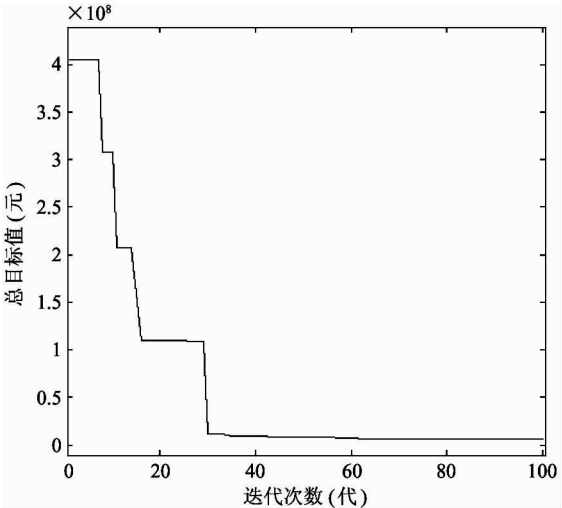


图 4 最优方案收敛图

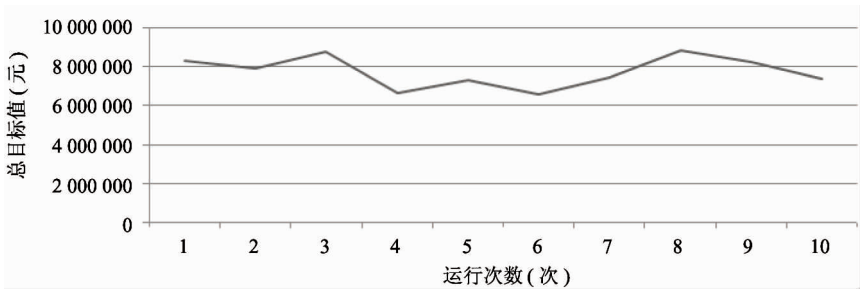


图 5 运行结果

4.3 方案有效性分析

通过对不考虑泊位时间窗的算例进行实验,其方案如表 6 所示,该方案的总目标值 $Z = 8\,222\,670$ 。

通过实验对比可知,采用本文算法和模型得到的方案较上述不考虑泊位时间窗的方案相比等待成本较低,总目标值下降了 19.9% ;

4.4 算法有效性

忽略模型中时间窗约束的影响,在不同算例规模下进行实验,分别采用本文改进的遗传算法和 CPLEX 进行求解,求解运行时间和目标函数值对比结果如表 7。

表 6 船舶调度方案	
船舶	路径
1	3-8-4-9-2-3
2	12-7-2-8-5-4-12
3	8-15-7-1-6-5-11-3-8
4	11-10-12-13-1-6-3-2-11
5	1-2-3-14-1
6	9-14-2-1-7-12-13-4-6-15-9
7	2-7-11-6-8-1-3-14-15-2
8	9-10-14-8-4-11-13-5-6-7-9

由表 7 可知,在小规模算例中,CPLEX 用时较短,而本文算法用时较长;在中等规模算例中,CPLEX 平均用时在 3 ~ 40 min 之间,且在求解较大规模的问题时,CPLEX 无法在有效的时间内给出最

优解,而本文算法均能在 10 min 之内给出有效解;另外本文算法与 CPLEX 的求解偏差均在 10% 以内。因此,本文算法适用于求解大中规模的不定期船舶调度问题。

表 7 改进遗传算法和 CPLEX 结果比较

港口数	实验	改进遗传		CPLEX		GAP
		目标值	运行时间(s)	目标值	运行时间(s)	偏差
8	1	2606820	124	2430540	16	6.7%
	2	2615560	125	2551240	14	2.5%
	3	3273320	135	3218020	24	1.7%
	平均值	2831900	128	2733267	18	3.5%
10	1	4459050	203	4313590	60	3.3%
	2	4799470	172	4729990	48	1.4%
	3	5475920	199	5202490	384	4.9%
	平均值	4911480	191	4748690	164	3.3%
12	1	7247970	359	7004350	3605	3.4%
	2	7211180	352	7100480	3142	1.5%
	3	7584100	357	7316750	862	3.5%
	平均值	7347750	356	7140526	2536	2.8%
15	1	7553820	467	无数据		
	2	8096620	490			
	3	8234550	553			
	平均值	7961663	503			

4.5 与经典遗传算法对比分析

针对小规模算例分别用本文改进的遗传算法和经典遗传算法计算 10 次,对比各自求解结果,具体如表 8 所示。

表 8 Z 值结果对比

序号	传统遗传算法	改进遗传算法
1	3429640	3301860
2	3694700	3384640
3	3746820	3515100
4	3526080	3282340
5	3779640	3249020
6	3581740	3274440
7	3684420	3345200
8	3663340	3416640
9	3783240	3530120
10	3787460	3451000
平均值	3667708	3375036

由表 8 可知,改进遗传算法的收敛值明显优于传统遗传算法,由图 6 和图 7 看出改进遗传算法的收敛值波动幅度低,说明其具有更优的全局搜索能力和收敛精度。

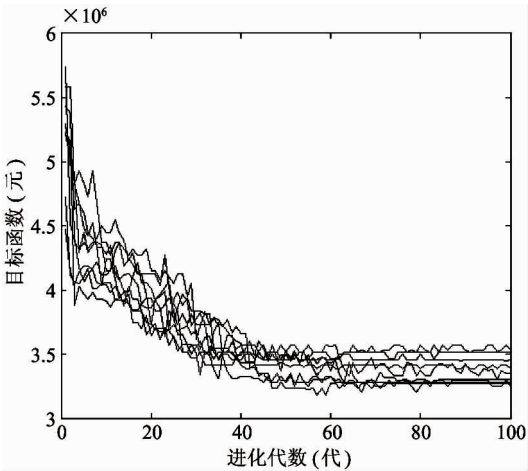


图 6 基于改进遗传算法运行结果收敛图

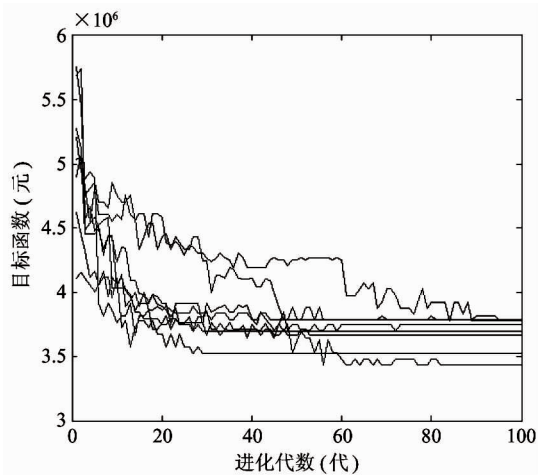


图7 基于传统遗传算法运行结果收敛图

5 结论

本文以运营区域航运网络上不定期运输的航运企业为研究对象,研究该类企业的不定期船舶调度优化问题。以调度船舶的总运营成本最小为优化目标,重点考虑港口可装可卸的实际情况,以及每个港口的泊位可用时间窗,构建了整数规划模型,并基于模型特点设计了融入禁忌搜索规则的遗传算法求解。算例实验表明,考虑泊位可用时间窗,以及由于每个港口的实际装卸带来的船舶舱容动态变化,可以更合理地设计船舶挂靠港口次序,减少总运营成本,为航运企业的实际调度提供辅助决策支持。

后续研究可以考虑船舶航速对运营成本的影响、需求可变对船舶调度过程的影响以及运输过程中的风险和不确定性等问题,使得不定期船舶的调度过程更符合现实情况。

参考文献

- [1] United Nations Conference on Trade and Development. Review of maritime transport 2014[J]. *Review of Maritime Transport*, 2014, 13(4):251-257
- [2] Arnesen M J, Gjestvang M, Wang X, et al. A traveling salesman problem with pickups and deliveries, time windows and draft limits[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 77(C):20-31
- [3] Wang S, Alharbi A, Davy P. Liner ship route schedule design with port time windows[J]. *Transportation Research Part C*, 2014, 41(2):1-17
- [4] Pang K W, Liu J. An integrated model for ship routing

with transshipment and berth allocation[J]. *Iie Transactions*, 2014, 46(12):1357-1370

- [5] 丁一,仲颖,林国龙. 软时间窗与随机航行时间的不定期船舶航线规划[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2015,49(03):387-391
- [6] Gelareh S, Meng Q. A novel modeling approach for the fleet deployment problem within a short-term planning horizon[J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2010, 46(1):76-89
- [7] Qiu Z B. A combined tramp ship routing, fleet deployment, and network design problem[J]. *Maritime Policy & Management*, 2015, 42(1):68-91
- [8] De A, Kumar S K, Gunasekaran A, et al. Sustainable maritime inventory routing problem with time window constraints[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2017, 61(C):77-95
- [9] Lin D Y, Liu H Y. Combined ship allocation, routing and freight assignment in tramp shipping[J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2011, 47(4):414-431
- [10] Andersson H, Christiansen M, Desaulniers G. A branch-price-and-cut method for a ship routing and scheduling problem with split loads[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(12):3361-3375
- [11] López-Ramos F, Guarnaschelli A, Camacho-Vallejo J F, et al. Tramp ship scheduling problem with berth allocation considerations and time-dependent constraints[C]. In: Mexican International Conference on Artificial Intelligence, Mexico City, Mexico, 2016. 346-361
- [12] Korsvik J E, Fagerholt K, Laporte G. A large neighbourhood search heuristic for ship routing and scheduling with split loads[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(2):474-483
- [13] Norstad I, Fagerholt K, Laporte G. Tramp ship routing and scheduling with speed optimization[J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2011, 19(5):853-865
- [14] Noshokaty S E. Shipping optimisation systems (SOS): tramp optimization perspective[J]. *Journal of Shipping & Trade*, 2017, 2(1):3
- [15] Psaraftis H N. Ship routing and scheduling: the cart before the horse conjecture[J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2017(2):1-14

Optimization of tramp ship scheduling on regional shipping network

Zheng Hongxing, Ren Yaqun, Wang Quanhui

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

Abstract

In order to reduce the operating cost of shipping enterprises providing irregular freight service on regional shipping network, the scheduling optimization of tramp ships is studied. Based on the premise that the freight requirements of different ports in the region are known, the time window of berths and the actual conditions of loading and unloading in each port are focused on, considering the realistic constraints such as the time window of cargo service of the port and ship capacity, an integer programming model is built to minimize the total operating costs of all dispatched ships during the planning period. A genetic algorithm embedded with tabu search rules is designed to solve the model. The order of the ports of call and the cargo transported by all ships are given. The improved genetic algorithm is compared with CPLEX and traditional genetic algorithm to verify the validities of the model and algorithm. The results show that considering the berth time window and loading and unloading in each port can reduce operating costs.

Key words: waterway transportation, ship scheduling, improved genetic algorithm, tramp ship, berth time window