

长江散杂货程租多船调度规划

邢蒙, 王文, 徐祝源, 何利军

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为优化长江散杂货运输在动态市场需求下的船舶调度方案, 构建整船和非整船程租两种模式下的多船舶调度规划模型, 选择每船最佳运单集和航行路线。模型以多船舶程租在研究期内的总利润为目标, 考虑货物装卸时间窗、港口位置、运价、运量、船舶位置、载货状态、以及运力等约束, 采用以线性尺度变化计算父代种群适应度、锦标赛选择算子构成的遗传算法求解模型。利用武汉—上海段的散杂货程租数据, 运行 PyCharm CE + python 3.7, 得到每艘船舶的调度优化方案。结果显示: 非整船模式下单船和多船的成本、运力利用率均优于整船运输模式, 个别船舶的利润在整船模式下较高, 而多船总利润仍是非整船模式较高。因此长江散杂货程租船舶运营宜采用非整船模式。

[关键词] 多船舶调度; 程租; 长江水运; 剩余舱位; 即期货物; 矩阵制遗传算法

[中图分类号] U 69

Operation Plans for Voyage Charter of Multiple Vessels to Carry Bulk and General Cargoes in Chang Jiang

XING Meng, WANG Wen, XU Zhuyuan, HE Lijun

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to optimize vessel operation plans for the transport of bulk and general cargoes in Chang Jiang under the dynamic market demand, it is to establish multi-vessel operation models in two modes of whole ship voyage charter and partial space charter and to choose the best collection of freight orders and navigation route for each vessel. The models aim at the aggregate profits of multiple vessels on voyage charter during the period, considering the constraints such as loading and unloading time window, port location, freight rate, freight volume, ship position, laden state and capacity, then the models are solved by matrix genetic algorithm, which calculates the fitness of parent population by linear scale change, and use tournament selection operator. The voyage charter data of the Wuhan-Shanghai section of the Chang Jiang are applied to the two models, then to obtain the optimization plan for each ship by running PyCharmCE + python 3.7. The results show that the overall cost and capacity utilization of single ship and multiple ships under the mode of partial space charter are all both better than the mode of whole ship charter. Although the profits of some ship is ships are higher in the mode of whole ship charter, the overall profit of the fleet is still higher in the partial space mode. Therefore, it is better to adopt

[收稿日期] 2022-05-17

[基金项目] 厦门市自然科学基金项目 (3502Z20227212); 福建省中青年教育科研项目 (JAT210221, JAT220181); 福建省本科高校教育教学研究项目 (FBJG20220200); 国家自然科学基金项目 (52201411); 中国交通教育研究会教育科学研究课题 (2022.444); 集美大学科研基金项目 (ZQ2022042)。

[作者简介] 邢蒙 (1996—), 女, 硕士生, 从事交通运输规划与管理方向研究。通信作者: 王文 (1978—), 女, 博士, 副教授, 从事交通运输规划与管理方向研究。

the partial space charter mode for the transport of bulk and general cargoes in Chang Jiang.

Keywords: multi-vessel scheduling; voyage charter; Chang Jiang water transportation; remaining space; spot cargoes; matrix genetic algorithm

0 引言

长江水运对流域经济发展有重要支撑作用,中小型民营散货船因为灵活自如的特性,分担了长江流域将近 80% 散货货运量,成为长江干散货运输的主要运输方式,但这些中小航运企业对于挂靠港口的选择、运力配载、船舶调度等缺乏科学的规划和决策方法,市场中存在大量的即期货物运输需求,存在运力和燃油浪费的现象,增加了航运企业营运成本。因此为了帮助长江航运市场中的中小航运企业降低营运成本、提高企业利润和效率,需要对既定需求与即期需求同时存在时多艘船舶、多个货物运单的船舶调度问题选择合适的规划方案。

近期国内有一些不定期船调度和内河运输船舶调度方面的研究。如:任亚群^[1]重点考虑泊位时间窗构建多船多港多货的整数规划模型,并设计了嵌入禁忌搜索规则的遗传算法求解;陈翰林^[2]根据不同的市场油价、船舶的载货状态和货物的装运时间要求,设定可变航速,考虑了运输过程中出现新的即期货物运输需求,建立调度模型;石英杰^[4]提出了多船多任务多港口航线配船的不定期船舶调度问题,以营运总利润最大为目标,建立了受到装载期约束的非线性模型。其他研究主要包括与航速的联合优化、是否考虑换船作业及货物时间价值损失等问题^[4-6]。

国际上在这方面的研究内容较为广泛,涉及港口锚地、驳船、航速及碳排放的优化。如:Inkyung 等^[7]提出一种使同目的港船舶到达锚地的顺序与目的港服务能力同步协调的船舶调度优化方法;Lingxiao 等^[8]通过将混合整数线性规划转换为增强的集合覆盖模型,研究不定期船运输的船队调整、货物选择和船舶路线问题;Jonghwa 等^[9]对合同船舶和现货船舶提出了基于弧流和基于路径流的模型来解决船舶路线和调度问题。其他研究主要包括考虑拖船运输路线优化、潜在延误和广义成本等方面^[10-12]。

本文与已有文献相比主要有三方面不同:1) 针对内河货运特点,在程租方式中研究非整船模式^[13]下的多船舶调度规划模型;2) 考虑市场的动态需求,兼顾单船载运顺序与航行路径的最优和多船总体利润的最优;3) 改进传统遗传算法,引入新的选择算子,并改进适应度函数,通过实例验证模型和算法的有效性,并对比非整船和整船两种模式下船舶运输在利润、成本、运力利用率等方面的差异。为长江中小航运企业选择货运模式、优化船舶调度方案提供理论依据。

1 问题描述与相关设置

1.1 问题描述

已知每船的既定货运任务,在确保可完成该任务的前提下,自由选择市场上的即期货运任务。整船运输模式下,一艘船同一时间只可运输一单货,而非整船模式无此约束。以研究期内多船舶运输总体利润最大为目标,考虑货物装卸港口和时间窗、运价、运量等因素,为每艘船选择即期运单,并求解每艘船的最佳调度路线。

1.2 条件假设

1) 所有船舶为同一船型;2) 所有港口的停泊费及使费费率相同;3) 只装载可共同运输的货物,所有货物的装卸效率相同;4) 订单货物装卸安排在出发前确定,出发后不再更改;5) 所有船舶均从初始港口出发;6) 船舶从进港到离港时间等于货物装卸时间,不考虑等泊、滞港等其他因素;7) 船舶以恒定航速航行。

1.3 参数设置

M 表示所有港口依次编号组成的集合; N 表示运单集合, $N = N_c \cup N_o$, 其中, N_c 表示既定运单集合, N_o 表示即期运单集合; K 表示船舶集合; $p(i), i \in N$ 表示运单 i 的装卸货港口; $R_i, i \in N$ 表示运

单 i 的收益; v_1 表示货物装卸效率 (t/h); $x_{ki}, k \in K, i \in N$ 表示 0~1 变量, 船 k 是否选择 i 运单, 是为 1, 否为 0; Q_i 表示质量参数, 当 $i \in N$ 时, 表示运单 i 的货物质量, 当 $i \in K$ 时, 表示船 k 的质量; $\Delta T_{kj}, k \in K, j \in M$ 表示船舶 k 在港口 j 的停泊时间, $\Delta T_{kj} = Q_i \cdot x_{ki} / v_1$; $T_{k,j}, k \in K, j \in M$ 表示船 k 到达 j 港的时间点; $d_{ij}, i, j \in M$ 表示港口 i 与港口 j 之间的航行距离; $v_{k,i,j}, k \in K, i, j \in M$ 表示船 k 从 i 港开往 j 港的航行速度; $T_{k,i,j}, k \in K, i, j \in M$ 表示船 k 从 i 港口开往 j 港的航行时间, $T_{k,i,j} = d_{i,j} / v_{k,i,j}$; s 表示船舶数量; D 表示船舶的载重吨 (船舶净载重吨); $Q_{zlk,ij}$ 表示各航段船舶正常航行时主机燃油消耗量 (t); α 表示船舶主机基本耗油系数; P_{z1} 表示船舶主机在常用工况下的功率 (kW); g_{ez1} 表示船舶主机在常用工况下的燃油消耗率 (kg/(kW·h)); C_1 表示单位油价 (元/kg); C_2 表示单位时间港口停泊费用 (元/(t·h)⁻¹); C_3 表示单位载重吨港口使用费 (元/t); C_4 表示单位时间货物装卸成本 (元/h); T 表示船舶总运营天数 (船舶从出发到结束货运任务的天数, 不满一天按一天算); G 表示船舶每天的固定成本; $O_i, i \in N$ 表示第 i 个运单的出发港口; $E_i, i \in N$ 表示第 i 个运单的目的地港口; $(Te_{oi}, Tl_{oi}), i \in N$ 表示装载运单 i 的船舶的到港时间窗限制; $(Te_{di}, Tl_{di}), i \in N$ 表示卸载运单 i 的船舶的到港时间窗限制; A 表示一个充分大的正数; P_i 表示第 i 项惩罚成本, $i = \{1, 2, 3, 4\}$; $f(x)$ 表示等待成本函数, $f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \lambda_1 \cdot x, & x > 0 \end{cases}$, λ_1 表示等待成本函数系数; $g(x)$ 表示迟到成本函数,

$g(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \lambda_2 \cdot x^2, & x > 0 \end{cases}$, λ_2 表示迟到成本函数系数; $w_{k,j,j+1}, k \in K, j \in M$ 表示船 k 在 j 到 $j+1$ 港口 (相邻港口) 之间的货物载质量, 当 $O_i \leq j \leq d_i$ 时, $w_{k,j,j+1} = \sum_{i \in N} q_i \cdot x_{ki}$, 否则 $w_{k,j,j+1} = 0$; $y_{kj}, k \in K, j \in M$ 表示 0~1 变量, 船 k 是否选择港口 j 停靠, 是为 1, 否为 0; $\alpha_{ij}, i \in N, j \in M$ 表示 0~1 变量, 运单 i 的出发港口是否为港口 j , 如果 $O_i = j$, 那么 $\alpha_{ij} = 1$, 否则 $\alpha_{ij} = 0$, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$; $\beta_{ij}, i \in N, j \in M$ 表示 0~1 变量, 运单 i 的到达港口是否为港口 j , 如果 $d_i = j$, 那么 $\beta_{ij} = 1$, 否则 $\beta_{ij} = 0$, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ 。

2 多船舶运输调度模型

2.1 整船运输调度模型

整船运输调度模式如图 1 所示。船舶 1、船舶 2 在 A 港进行装货作业, 船舶 1 装载从 A 港至 I 港的货物, 对于 F 港的即期货物运输需求, 船舶 1 需在 I 港卸货之后, 空载航行至 F 港, 继续装载货物, 运至 H 港卸货; 船舶 2 装载从 A 港至 G 港的货物, 在 G 港卸货后, 空载航行至 C 港, 装载从 C 港至 I 港的货物, 运行至 I 港卸货。经营人在收到 C 港和 F 港出现的即期货物运输需求时, 对船舶重新规划调度, 以获取更大收益。

构建整船模式的调度模型为

$$\begin{aligned} \max W_{lr} = & \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} R_i \cdot x_{ki} - \left(\sum_{k \in K} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} \left[\alpha + \frac{w_{k,i,j}}{D} (1 - \alpha) \right] P_{z1} g_{ez1} T_{k,i,j} \cdot C_1 + \sum_{i=1}^4 P_i + \right. \\ & \left. G \cdot T + \sum_{k \in K} \sum_{j \in M} D \cdot C_2 \cdot y_{kj} + D \cdot C_3 \cdot \sum_{k \in K} \sum_{j \in M} y_{kj} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \frac{C_4 \cdot Q_i \cdot x_{ki}}{v_1} \right). \end{aligned} \tag{1}$$

式 (1) 为目标函数, 以利润最大为目标, 即船舶运营的收益减去船舶运营各项成本。成本包括油耗成本、时间惩罚成本、固定成本、停泊成本、港口使费以及装卸费用。其中 P_i 为时间惩罚成本,

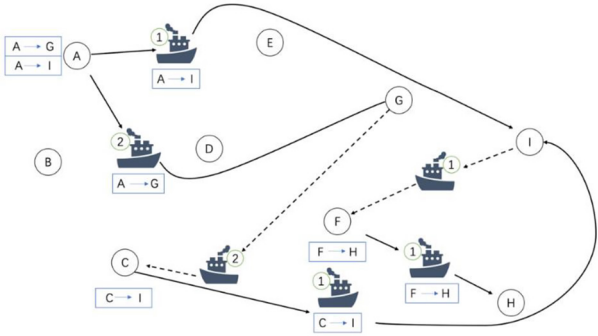


图 1 整船运输调度模式
Fig.1 Scheduling mode of whole ship

是指货物在选择某运单后，未能在货物要求的时间内达到指定的装卸货港口而需要支付给货主的赔偿费用，即迟到成本，以及船舶提前到达装卸货港口而产生的船舶等待成本。

算式分别为：

1) 装货港等待成本 $P_1 = \sum_{k \in K} \sum_{j \in \{o_i | i \in N\}} f(\max\{0, T_{e,o,i} - T_{k,j}\}) \cdot y_{k,j}$;

2) 装货港迟到成本 $P_2 = \sum_{k \in K} \sum_{j \in \{o_i | i \in N\}} g(\max\{0, T_{k,j} - ?T_{kj} - Tl_{o,i}\}) \cdot y_{k,j}$;

3) 卸货港等待成本 $P_3 = \sum_{k \in K} \sum_{j \in \{d_i | i \in N\}} f(\max\{0, T_{e,d,i} - T_{k,j}\}) \cdot y_{k,j}$;

4) 卸货港迟到成本 $P_4 = \sum_{k \in K} \sum_{j \in \{d_i | i \in N\}} g(\max\{0, T_{k,j} - ?T_{kj} - Tl_{d,i}\}) \cdot y_{k,j}$.

约束条件：

- 1) 一个运单只能由一艘船整船运输，不分开装运，即 $\sum_{k \in K} x_{ki} \leq 1, \forall i \in N$;
- 2) 一艘船至少会选择一个运单进行运输，即 $\sum_{i \in N} x_{ki} \geq 1, \forall k \in K$;
- 3) 每船同一时间只运输一个运单，即

$$0 \leq y_{k,j} \leq 1 - (\frac{j - O_i}{E_i - O_i} \cdot \frac{E_i - j}{E_i - O_i}), \forall k \in K, \forall j \in M;$$

(2)

- 4) 既定运单一定被运输，即 $\sum_{i \in N_c} x_{ki} = 1, \forall k \in K$;
- 5) 船舶运输的货物质量不能超过船舶最大载质量限制，即

$$x_{k,i} \cdot q_i \leq D, \forall k \in K, \forall i \in N;$$

(3)

6) 时间窗约束，船 k 在初始港的时间点为 0，即 $T_{k,1} = 0, \forall k \in K, k = 1, 2, \cdots, s$; 船 k 到达 j 港的时间点（到达 i 港的时间点 + 在 i 港的停泊时间 + i 港开往 j 港的航行时间），即 $T_{k,j} = T_{k,i} + \Delta T_{ki} + T_{k,i,j}, \forall k \in K, \forall i, j \in M$ 。

- 7) 没有船舶停靠的港口必然不是货物的装货港或卸货港，即 $\sum_{i \in N} (\alpha_{ij} + \beta_{ij}) x_{ki} \leq A \cdot y_{k,j}, \forall k \in K, \forall j \in M$;

- 8) 所选运单的装卸货港口必然停靠，即 $y_{k,j} = x_{ki}, j \in p(i)$ 。

2.2 非整船运输调度模型

非整船运输调度模式如图 2 所示。在原计划下，船舶 1、船舶 2 在 A 港进行装货作业，船舶 1 装载从 A 港至 I 港的货物，船舶 2 装载从 A 港至 G 港的货物。航运市场出现新的货物运输需求，经营人重新规划航行线路，船舶 1 航行至 C 港，挂靠继续装载货物，把 A 港至 I 港的货物和 C 港至 I 港的货物共同运输至 I 港进行卸货，船舶 2 从 A 港航行至 F 港，进行挂靠继续装载货物，装载 A 港至 G 港的货物和 F 港至 H 港的货物，航行到 G 港，把 A 港至 G 港货物卸下，继续航行至 H 港，卸载 F 港至 H 港的货物。

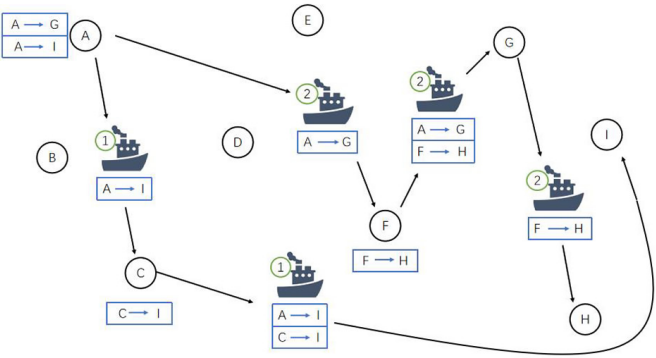


图 2 非整船运输调度模式
Fig.2 Scheduling mode of partial space

目标函数与式（1）相同，约束条件的不同在于一艘船舶可以同时运载多个运单，因此约束条件中无式（2），式（3）替换为式（4），表示船舶运输的货物质量不能超过船舶最大载重限制。即有

$$w_{k,j,j+1} \leq D; O_i \leq j \leq d_i, \forall k \in K.$$

(4)

3 算法选择与设计

本文采用矩阵制遗传算法改进遗传算法求解模型,在算法编码中,运单选择变量用矩阵来表示,染色体交叉和变异实际上是矩阵间的交叉和变异,并改进适应度函数和算子。

1) 初始化种群。设有 s 艘船舶可供调度,随机产生 U 个可行的染色体,多船运单选择模型中每个染色体 X_i 如式 (5) 所示。每一行表示一艘船选择的运单策略, s 行的运单选择策略共同构成整个染色体,每一个基因值为随机产生的 0 或 1。 U 个染色体构成了整个种群。即有

$$X_i = \begin{pmatrix} (x(i))_{1,1} & \cdots & (x(i))_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ (x(i))_{s,1} & \cdots & (x(i))_{s,n} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2) 适应度函数。最大值问题通常以目标函数作为算法的适应度函数,然而这种方法具有一定的局限性,计算得到的个体适应度值可能存在分布不合理的问题,难以反映个体特征,因此需要转换。本文采用线性尺度变化计算父代种群适应度,在初期维持种群多样性,降低适应度差异程度,在算法运行后期保证优秀个体保留,提高适应度差异程度,算式为

$$F' = a_1 F + a_2; a_1 = (a_3 - 1)F_{\text{avg}} / (F_{\text{max}} - F_{\text{avg}}); a_2 = (F_{\text{max}} - a_3 F_{\text{avg}})F_{\text{avg}} / (F_{\text{max}} - F_{\text{avg}})。$$

式中: F_{avg} 为原始适应度平均值; F_{max} 为原始适应度的最大值; a_3 为最佳个体复制数,其范围一般为 1.0~2.0,本文取值为 1.5。

3) 选择算子。传统遗传算法在选择操作时采用轮赌盘或精英策略,本文采用锦标赛选择方法,确定参数规模 $k=2$,经过锦标赛选择后,将子代个体与父代个体合并,再根据快速非支配排序和拥挤度算子进行排序,选出最优的前 n 个个体,保证种群规模不变。

4) 交叉算子。设 P_c 为交叉概率,每一个个体的染色体在 $[0,1]$ 之间随机产生一个数 r 。如果 $r \leq P_c$,选择该个体的染色体。重复上述过程 U 次,得到 γ 个个体的所有染色体。如果 γ 是奇数,在种群中随机选择一个个体的染色体,使得 γ 成为偶数。将选择得到的个体染色体进行两两配对, $(u_1, u_2), (u_3, u_4), \cdots, (u_{\gamma-1}, u_{\gamma})$ 。对每一对个体染色体进行单点交叉,设定某一基因的位置为交叉点,交换交叉点后的部分基因,从而产生两个新的个体。

5) 变异算子。每一组染色体在 $[0,1]$ 之间产生一个随机数 r ,如果随机数大于变异概率 p ,那么该染色体组保持不变;如果小于 p ,则随机选中染色体矩阵中的某一系列其中一个为 1 的元素,将其变为 0,并在该列随机选择一个 0 元素变为 1;如果该列元素都为 0 或者 1,则随机选中一个元素变为 1 或者 0。即随机挑选两艘船的运单进行互换,再去检验新染色体的可行性,如果满足模型约束,表示变异成功。

6) 终止条件。对种群进行初始化、适应度计算,并进行选择、交叉和变异等操作,使种群不断优化,经历多次迭代,当解收敛平稳后,停止迭代,得到的解也就是船舶调度策略的最优解。

下面通过长江散杂货程租船舶调度的实际数据分析模型和算法的有效性和效率。

4 长江散杂货程租船舶调度实例分析

4.1 相关数据

选择长江中下游武汉至上海段航线,研究期为 9 d。使用本文船舶调度模型及改进的遗传算法求解,设定种群个数为 100,迭代次数为 800 次,种群变异概率为 0.7,交叉概率为 0.7。

1) 船舶、港口及航程相关数据。设承运人共有 4 艘船舶,每船净质量 5000 t,最大载质量为 5 000 t,船舶相关参数如表 1 所示。长江中下游从武汉至上海共有 19 个港口,各港口间的航行距离来源于长江航道里程表。

2) 运单信息。运单信息如表 2 所示。表 2 中货物种类 0 表示即期运单,1 表示原程租运单。

表 1 船舶相关参数
Tab. 1 Ship Related Parameters

船舶长度 Ship length/m	船舶宽度 Ship width/m	最大吃水 Maximum draft/m	主机功率 Main engine power/kW	最大载重吨 Maximum load tons/t	主机燃油消耗率 Main engine fuel consumption rate/ [kg · (kW · h) ⁻¹]	燃油价格 Fuel price/ (元 · kg ⁻¹)
100	17.1	4	600	5000	0.181	6890
运营成本 Operation cost/ (元 · d ⁻¹)	港务费 Harbour dues/ (元 · (NT) ⁻¹)	港口平均停泊费率 The average port parking rate/ (元 · (t · d) ⁻¹)	装卸费 Cost of loading and unloading/ (元 · h ⁻¹)	装卸效率 Efficiency in loading and unloading/ (t · h ⁻¹)	经济航速 Economic speed/ (km · h ⁻¹)	
4000	0.55	0.08	19	3200	19	

表 2 运单信息
Tab. 2 Waybill Information

序号 Serial number	货物种类 Type of goods	载质量 Dead weight/t	运价 Freight rate/元	装货港 Port of loading	装载期 Loading period	卸货港 Port of unloading	卸货期 Unloading period
0	0	700	40	黄石 Huangshi	0805T00—0806T24	上海 Shanghai	0807T12—0809T24
1	0	1000	27	南京 Nanjing	0803T00—0804T24	九江 Jiujiang	0805T00—0806T24
2	0	1000	38	黄石 Huangshi	0803T00—0804T24	常熟 Changshu	0805T00—0807T24
3	0	1000	24	武汉 Wuhan	0801T00—0802T24	马鞍山 Maanshan	0803T12—0805T24
4	0	1000	19	芜湖 Wuhu	0804T00—0803T24	黄石 Huangshi	0804T00—0806T12
5	0	2000	35	江阴 Jiangyin	0801T00—0803T24	九江 Jiujiang	0803T00—0806T24
6	0	2500	27	南京 Nanjing	0804T00—0805T24	芜湖 Wuhu	0806T00—0807T24
7	0	2500	37	黄石 Huangshi	0804T00—0805T24	南京 Nanjing	0806T00—0807T24
8	0	1500	30	黄石 Huangshi	0804T00—0806T24	南京 Nanjing	0805T00—0807T24
9	0	2500	20	马鞍山 Maanshan	0806T00—0807T24	镇江 Zhenjiang	0808T00—0809T24
10	0	2500	40	黄石 Huangshi	0806T00—0807T24	常熟 Changshu	0808T00—0810T24
11	0	3000	23	黄石 Huangshi	0804T00—0805T24	常熟 Changshu	0806T12—0808T24
12	0	2000	30	黄石 Huangshi	0806T00—0807T24	江阴 Jiangyin	0806T12—0809T24
13	0	2000	30	江阴 Jiangyin	0809T00—0809T24	黄石 Huangshi	0809T12—0810T24
14	0	2000	40	黄石 Huangshi	0801T00—0803T24	上海 Shanghai	0803T12—0805T24
15	0	2000	40	黄石 Huangshi	0804T00—0805T24	上海 Shanghai	0805T00—0808T24
16	0	2000	18	安庆 Anqing	0804T00—0805T24	南通 Nantong	0805T12—0807T24
17	0	2300	20	马鞍山 Maanshan	0806T00—0809T24	常熟 Changshu	0808T00—0810T24
18	0	2500	20	南京 Nanjing	0805T00—0806T24	九江 Jiujiang	0806T00—0809T24
19	0	2500	20	马鞍山 Maanshan	0806T00—0808T24	常熟 Changshu	0808T12—0809T24
20	0	2500	19	马鞍山 Maanshan	0806T00—0807T24	南京 Nanjing	0807T00—0809T24
21	0	2500	20	马鞍山 Maanshan	0806T00—0807T24	镇江 Zhenjiang	0808T12—0809T24
22	0	3000	36	黄石 Huangshi	0802T00—0805T24	马鞍山 Maanshan	0804T00—0806T24
23	0	3000	39	九江 Jiujiang	0802T00—0804T24	上海 Shanghai	0804T00—0805T24
24	0	3000	36	黄石 Huangshi	0805T00—0807T24	马鞍山 Maanshan	0807T00—0809T24

续表 2

序号 Serial number	货物种类 Type of goods	载质量 Dead weight/t	运价 Freight rate/元	装货港 Port of loading	装载期 Loading period	卸货港 Port of unloading	卸货期 Unloading period
25	0	3000	16	芜湖 Wuhu	0808T00—0809T24	马鞍山 Maanshan	0809T00—0810T24
26	0	3500	36	黄石 Huangshi	0806T00—0807T24	马鞍山 Maanshan	0808T00—8/9/24
27	0	3500	21	马鞍山 Maanshan	0803T00—0807T24	黄石 Huangshi	0807T12—0809T24
28	0	4000	22	南京 Nanjing	0806T00—0807T24	黄石 Huangshi	0807T00—0809T24
29	1	3000	35	张家港 Zhangjiagang	0803T00—0804T24	黄石 Huangshi	0801T00—0806T24
30	1	3000	35	张家港 Zhangjiagang	0801T00—0802T24	黄石 Huangshi	0803T00—0804T24
31	1	3500	40	武汉 Wuhan	0801T00—0802T24	太仓 Taicang	0802T00—0804T24
32	1	4000	22	江阴 Jiangyin	0802T00—0803T24	黄石 Huangshi	0803T00—0806T24
33	1	3500	36	武汉 Wuhan	0801T00—0803T24	江阴 Jiangyin	0802T00—0805T24
34	1	3600	38	武汉 Wuhan	0801T00—0803T24	江阴 Jiangyin	0802T00—0804T24
35	1	3800	38	武汉 Wuhan	0801T00—0802T24	江阴 Jiangyin	0802T00—0805T24
36	1	4000	25	江阴 Jiangyin	0801T00—0803T24	黄石 Huangshi	0802T00—0804T24

数据来源：水陆联运网
Data source: Lanrd and Water Transport Network. <http://ship56.net>

4.2 求解结果

模型求解软件平台为 PyCharm CE，运行环境为 python 3.7，运用改进遗传算法求解。

1) 迭代结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，两种模式的迭代收敛速度都很快，都在迭代 50 次左右得出最优结果，且收敛到最优值后非常稳定，可以说明模型和算法有效。

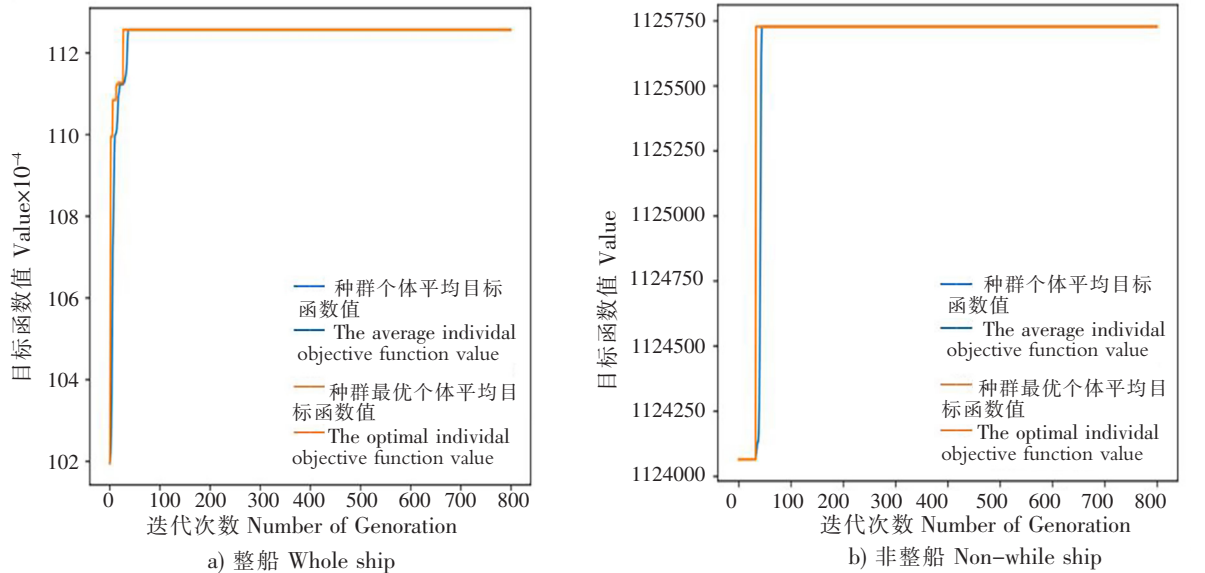


图 3 迭代结果
Fig.3 Iteration results

2) 船舶运单选择与调度方案如表 3 所示。表 3 是整船和非整船两种模式下 4 条船舶的运单选择结果和调度方案。

整船模式下，船 1 有 6 段实载航线以及两段空载航线，船 2 有 6 段实载航线以及一段空载航线，

船 4 有 6 段实载航线以及 3 段空载航线；非整船模式下，船 1、船 2 有 6 段实载航线，船 4 有 5 段实载航线以及 2 段空载航线。可知整船模式航线更长，因此所耗费的燃油成本更高，所需的航行时间更多。整船模式完成 6 个订单所需时间在 8~9d，而非整船模式是 7~8d，整船程租总利润为 738 347.6 元，非整船程租总利润为 970 356.7 元。所以非整船模式不仅利用了剩余运力，也节省了固定成本，将会有更多的市场机会。

表 3 两种模式下船舶运单选择结果与调度方案

Tab. 3 Results of Waybill Selection and Scheduling Scheme in Two Modes

船舶 Ship	运单选择 Waybill selection		装货港到达时间 Arrival time of loading port		卸货港到达时间 Arrival time of unloading port	
	整船程租 Whole ship charter	非整船程租 Non-whole ship charter	整船程租 Whole ship charter	非整船程租 Non-whole ship charter	整船程租 Whole ship charter	非整船程租 Non-whole ship charter
1	35	35	0801T0000	0801T0000	0803T0238	0803T0318
	36	36	0803T0238	0803T0318	0804T2154	0805T0013
	8	10、7	0804T2154	0805T0013	0806T0913	0806T0726
	6	7	0806T0913	0805T0013	0806T1842	0806T2218
	18	6、18	0806T2358	0806T2218	0808T0415	0807T0347
	20	18	0809T0349	0806T2218	0809T0734	0808T0024
2	34	34	0801T0000	0801T0000	0802T2256	0803T0136
	32	32	0803T0056	0803T0136	0804T1917	0804T2102
	7	22	0804T1917	0804T2102	0806T0323	0806T0447
	28	21、20	0806T0323	0806T0447	0807T1546	0807T0005
	12	20	0807T1546	0806T0447	0809T0816	0806T1137
	19	28	0809T0816	0807T0713	0809T2141	0808T0506
3	33	33	0801T0000	0801T0000	0802T1806	0802T1806
	5	5	0802T1806	0802T1806	0803T0758	0803T0758
	23	23	0803T0758	0803T0758	0805T0851	0805T0851
	29	29	0805T1656	0805T1656	0807T1438	0807T1438
	24	26	0807T1438	0807T1438	0808T2356	0808T0056
	27	27	0808T2356	0808T0056	0809T0813	0809T0915
4	31	31	0801T0000	0801T0000	0803T1356	0803T0736
	30	30	0803T2224	0803T1543	0805T1815	0805T1027
	22	24	0805T1815	0805T1027	0807T0623	0806T1756
	9	19、17	0807T0623	0806T1756	0807T1755	0807T1342
	21	17	0808T0523	0806T1756	0808T1707	0807T1342
	17	25	0809T0336	0808T1137	0809T2157	0808T1803

两种模式下的船舶营运结果对比如图 4 所示。由图 4 可以看出，船舶平均载重率和利润，非整船

模式都更优于整船模式,因此非整船的调度模式更具优势。

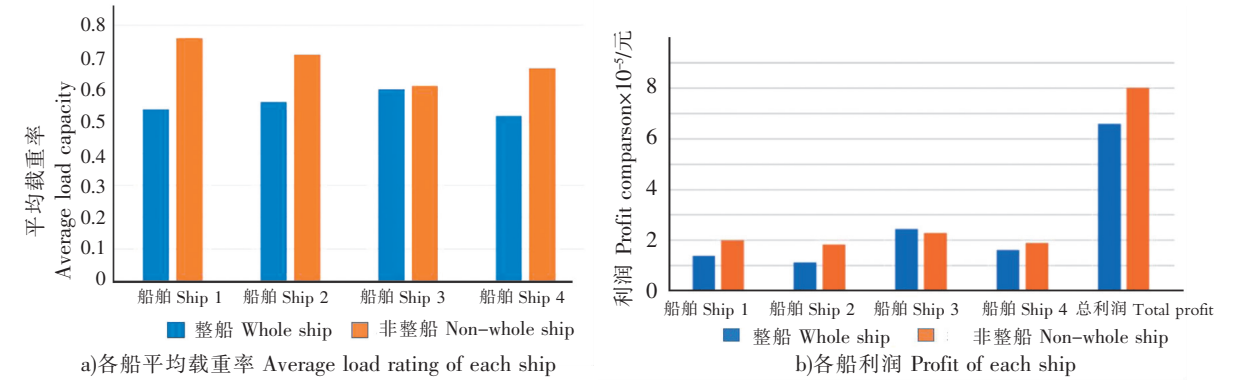


图 4 两种模式下的船舶营运结果对比
Fig.4 Comparison of ship operating results under two modes

5 结论

本文根据长江散杂货水路运输市场动态,建立整船和非整船程租多船调度模型,在保证可以完成原运单任务的前提下,合理选择即期货运需求,并制订相应调度方案,优化长江水运散杂货多船多运单分配和船舶航行路线规划问题。求解模型采用改进的遗传算法,应用线性尺度变化计算父代适应度,结合锦标赛选择算子、交叉算子和变异算子进行算法设计。利用长江武汉—上海段 19 个港口的货运数据,应用该模型得到整船与非整船两种模式下总利润最优的各条船舶的运单选择和路线方案。比较两种模式下船舶的营运效果,得出非整船模式的营运效果总体上优于整船模式。

[参 考 文 献]

[1]任亚群.考虑泊位空闲时间的不定期船舶调度优化[D].大连:大连海事大学,2020.

[2]陈翰林.基于需求变动与可变航速的不定期船舶调度研究[D].集美:集美大学,2020.

[3]石英杰.受装载期约束的干散货不定期船舶调度模型研究[D].集美:集美大学,2021.

[4]范厚明,于佳琪,马梦知,等.模糊时间窗下多船型不定期船调度与航速联合优化[J].上海交通大学学报,2021,55(3):297-310.

[5]王清斌,肖勤飞,李秀英,等.考虑换船作业的长江干线集装箱船舶调度[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(2):41-47,54.

[6]张安莉,席天为.考虑货物时间价值的船舶调度多目标优化方法[J].乐山师范学院学报,2020,35(12):8-14.

[7]SUNG I,ZOGRAFAKIS H,NIELSEN P. Multi-lateral ocean voyage optimization for cargo vessels as a decarbonization method [J]. Transportation Research Part D:Transport and Environment,2022,110:103407.

[8]WU L X,WANG S A A,LAPORTE G. The robust bulk ship routing problem with batched cargo selection [J]. Transportation Research Part B:Methodological,2020,143:124-159.

[9]LEE J,KIM B I. Mathematical models for a ship routing problem with a small number of ports on a route [J]. Applied Mathematical Modelling,2022,111:126-138.

[10]ZHU S Y,GAO J J,HE X T et al. Green logistics oriented tug scheduling for inland waterway logistics [J]. Advanced Engineering Informatics,2021,49:101323.

[11]GE F S,BEULLENS P,HUDSON D. Optimal economic ship speeds,the chain effect,and future profit potential [J]. Transportation Research Part B:Methodological,2021,147:168-196.

[12]MANUEL H R,PER J A,CASIANO M L P et al. A multi-criteria fleet deployment model for cost,time and environmental impact [J]. International Journal of Production Economics,2022,243:108325.

[13]赵刚.国际航运管理[M].大连:大连海事大学出版社,2006.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)