

文章编号:1006-2467(2021)03-0297-14

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.215

模糊时间窗下多船型不定期船调度与航速联合优化

范厚明<sup>1,2</sup>, 于佳琪<sup>1</sup>, 马梦知<sup>1,2</sup>, 蒋晓丹<sup>1,2</sup>, 慈吉利<sup>3</sup>, 翟志伟<sup>4</sup>

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 大连海事大学 战略管理与系统规划研究所, 辽宁 大连 116026; 3. 中远海运散货运输有限公司, 广州 510220; 4. 香港明华船务有限公司, 香港特别行政区 999077)

**摘 要:** 为了提高货主满意度的同时船公司能获得更好的经济效益,对不定期船调度与航速联合优化问题进行了研究,利用模糊时间窗刻画货主满意度,考虑自有船舶与租用船舶配置情况、航速等因素对船舶调度计划的影响,以航行成本、港口成本、时间成本、租船成本之和最小为目标,建立模糊时间窗下多船型不定期船调度与航速优化模型.提出一种变邻域遗传模拟退火算法进行求解:先将船型与货物匹配,再根据时间约束生成路径,最后采用邻域搜索策略提高求解质量.算例验证表明:船舶调度与航速联合优化可降低航行成本;注重货主的时间要求可提高其满意度.研究成果拓展了船舶调度及航速优化的相关理论,可为船公司优化不定期船调度及航速提供理论指导.

**关键词:** 不定期船; 航速优化; 船舶调度; 模糊时间窗

**中图分类号:** U 692      **文献标志码:** A

Heterogeneous Tramp Ship Scheduling and  
Speed Optimization with Fuzzy Time Window

FAN Houming<sup>1,2</sup>, YU Jiaqi<sup>1</sup>, MA Mengzhi<sup>1,2</sup>, JIANG Xiaodan<sup>1,2</sup>, CI Jili<sup>3</sup>, ZHAI Zhiwei<sup>4</sup>

(1. Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 2. Institute of Strategy Management and System Planning, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 3. COSCO Shipping Bulk Co., Ltd., Guangzhou 510220, China; 4. Hong Kong Ming Wah Shipping Co., Ltd., Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** In order to improve the cargo owner’s satisfaction and obtain better economic benefits for shipping companies, the ship deployment along routes and speed optimization of tramp ships are studied, considering the influencing factors of ship scheduling with the configuration and speed of self-owned ships and chartered ships. A goal is developed by minimizing sailing cost, fuel, and waiting cost at ports, penalty cost for late arrival at ports, time cost, and voyage ship chartering cost by applying fuzzy time window to characterize the cargo owner’s satisfaction. The model of scheduling and speed optimization with fuzzy time window for heterogeneous tramp ships is established. A variable neighborhood genetic simulated annealing (VNGSA) algorithm is presented to solve the problem. First, the ship type is matched with the cargo. Then the route is generated according to the time constraint. Finally, the neighborhood search strategy is adopted to improve the solution quality. Computational results indicate that integrated

收稿日期:2019-07-03  
基金项目:国家自然科学基金(61473053)、“双一流”建设专项(“创新项目”)(SSCXXM016)  
作者简介:范厚明(1962-),男,山东省蓬莱市人,教授,博士生导师,主要从事交通运输系统规划、战略管理与系统规划等领域的研究.  
电话(Tel.):0411-84725868; E-mail: fhm468@163.com.

planning for ship scheduling and speed can reduce sailing cost; considering time requirement of cargo owners can increase their satisfaction. This paper can enrich tramp ship routing and speed optimization problems and provide a theoretical tool for shipping companies to make related decisions.

**Key words:** tramp ship; speed optimization; ship schedule; fuzzy time window

燃油成本是船舶营运的主要成本,由于燃油消耗与航速之间存在非线性关系,航速的调节会引起燃油成本的大幅波动,而船公司为确保货物在规定的时间内被运送到目的地,需要优化配置船舶及其航速,以满足货主需要的同时获得更好的经济效益,因此,船舶调度与航速优化一直是船公司关注的问题。

近年来,学者们对不定期船调度问题与航速优化问题进行了深入探索. 针对不定期船调度问题, Jetlund 等<sup>[1]</sup>建立非线性整数规划模型,运用启发式分解方法解决多舱位化学品船调度问题. Fagerholt<sup>[2]</sup>研究软时间窗下不定期船调度问题,目标函数中加入违反时间窗所产生的惩罚成本. Brønmo 等<sup>[3]</sup>提出了一个多起始局部搜索算法解决不定期船调度问题,此算法能够在合理时间内为船公司的不定期船调度提供最优或接近最优方案. Korsvik 等<sup>[4]</sup>将禁忌搜索启发式算法运用到船公司决策支持系统,为多家船公司不定期船调度提供科学决策. Fagerholt 等<sup>[5]</sup>在模型中考虑了货物之间耦合性因素,以船公司获得最大利润为目标建立数学模型,设计了禁忌搜索算法解决工程船舶调度问题. Hemmati 等<sup>[6]</sup>采用自适应邻域搜索算法求解不定期船舶与库存路径相结合问题. Armas 等<sup>[7]</sup>考虑货物装货港与卸货港时间窗约束,建立离散时间窗船舶调度模型,采取贪婪随机自适应搜索与变邻域相结合算法解决带时间窗的不定期船调度问题。

针对不定期船调度拓展问题, Korsvik 等<sup>[8]</sup>和 Brønmo 等<sup>[9]</sup>为了解决货量可变不定期船调度问题,分别运用了禁忌搜索算法和列生成算法确定货物实际装载量及船舶调度计划. Meng 等<sup>[10]</sup>将燃油补给纳入到船舶调度问题中,建立了船舶调度与燃油补给联合优化模型. 鉴于船舶调度、航线优化、航线配船有很强关联性, Lin 等<sup>[11]</sup>建立了一个三方面问题联合优化的不定期船调度数学模型. 由于不定期船舶无固定航线与船期表,在实际情况中不定期船舶装卸货时间晚于货主期望时间是常有的情况,但是超出货主期望时间窗送达货物将会造成货主资金损失或产生过高库存成本,所以如何平衡货主满意度与最大限度控制航运企业成本是一个亟需解决

的实际问题,直接关系到船公司在整个不定期船舶运输市场上的竞争力. 为解决此问题, Yu 等<sup>[12]</sup>建立货主满意度最大化和承运人运营成本最小化双目标模型,通过模糊关系函数体现货主满意度,利用非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGAI)求解该问题,但此研究仅以既定船舶的单航次运输任务为研究对象. Thai 等<sup>[13]</sup>建立了一个衡量不定期船舶服务质量的模型,可将其应用于客户对船公司进行服务质量评估. Lee 等<sup>[14]</sup>针对班轮运输分析慢速航行与燃油消耗、航行时间、运输货物可靠性之间的关系. Mallidis 等<sup>[15]</sup>提出了一种分析建模方法,用于量化慢速航行对承运人的航次成本和托运人总成本的影响,证明了随着船舶航次接近结束,慢速航行和速度调整策略对托运人的总成本的影响趋于增加。

部分学者在航线确定情况下,对航速优化展开研究. Norstad 等<sup>[16]</sup>和 Hvattum 等<sup>[17]</sup>分别提出多起点搜索算法与精确算法求解固定航线上每一艘船舶最优航速. Harilaos 等<sup>[18]</sup>分析燃油价格、运费率、货物库存成本、装货量 4 个因素对航速优化与成本所产生的影响,为航运企业经济效益与改善环境提出合理建议. Fagerholt 等<sup>[19]</sup>从节能减排的角度出发,以追求整个航次的燃油消耗量最少为目标,建立了船舶航速优化数学模型,并提出了到达时间离散化的启发式算法对模型进行求解. 唐磊等<sup>[20]</sup>建立带时间窗的不定期船航线规划模型,设计了求解最优航速的递归平滑算法. 殷翔宇等<sup>[21]</sup>采用了控制变量法分别研究燃油价格及不同船舶固定成本的变化对不定期船舶航次日均盈利额的影响. 李铮等<sup>[22]</sup>解决航线不变情况下,不定期船舶运输的航速优化问题. 航速大小决定了船舶到达港口时间,从而影响货物选择和船舶调度计划,因此船舶调度与航速优化是相关联问题,部分学者对此进行联合优化. Wen 等<sup>[23]</sup>分别以最短航行时间、总成本最小、碳排放量最少为目标函数得出不同目标函数下船舶调度计划与最优航速. Wen 等<sup>[24]</sup>进一步细分了压载航程与载货航程的燃油消耗,考虑各地油价的差异性,运用分支定价和启发式列生成算法求解航速可变不定期船调度问题,但模型仅考虑航行成本,未考虑港口成本

等现实因素. 唐磊等<sup>[25]</sup>将航速对航次成本、航次时间的影响纳入到研究中,提出了不定期船调度的非线性网络规划模型,设计了基于集合划分方法的两阶段算法求解.但在假设中认为合同货物只要在规划期内运到即可,没有严格的装卸时间窗约束,并且在实例中未考虑租船运输货物情况.俞超等<sup>[26]</sup>认为在航运合约中速遣费、滞期费对港口选择有重要影响,因此加入速遣费、滞期费和货主存在违约等约束,利用两阶段粒子群算法,解决不定期船舶航速优化和港口选择问题;并指出在未来的研究中,可以考虑多船舶、多时期情况下的船舶调度和航速优化问题.李晓君等<sup>[27]</sup>研究不定期船舶中半潜船航速问题,在进行航速优化的同时考虑了货物分配问题,采取插入法与改进的递归平滑算法求解该问题.

通过对上述文献研究成果的梳理发现,现有研究多对不定期船调度与航速优化分别进行研究;少数船舶调度与航速联合优化的文献中只考虑了船公司经济效益,而忽视了货主满意度对船公司船舶调度计划的影响.同时,在实际情况下,为了不影响船公司信誉以及增加自身经济效益,对于自有船舶无法运输的货物,船公司可以采取租船方式进行运输.现有文献的模型较少包含租船方式运输货物的情况.针对以上问题,本文考虑货主满意度,船舶装载量对于燃油消耗的差异性以及船舶配置情况等实际因素,对多船型不定期船调度与航速进行联合优化,以增加船公司经济效益,提高运输可靠性,为不定期船调度方案的制定提供决策支持.

1 问题描述及模型建立

1.1 问题描述

在不定期船调度问题中,假设有  $n$  票货物,编号为  $i$ ,货物  $i$  对应的装货港和卸货港在运输网络中分别用节点  $i$  和节点  $n + i$  表示.  $N^P = \{1, 2, \dots, n\}$  是货物装货节点集合,  $N^D = \{n + 1, n + 2, \dots, 2n\}$  是货物卸货节点集合,不同的节点可以对应同一个地理位置相同的港口. 本文所研究的不定期船调度问题可以定义在一个  $(N^P \cup N^D, A)$  运输网络上,其中  $A = \{(i, j) : i, j \in N^P \cup N^D, i \neq j\}$ . 船队中可用船舶集合为  $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, \varphi\}$ . 在硬时间窗航速不变情况下船舶调度计划安排如图 1 所示,图中第 3 票与第 4 票货物由于自有船舶无法在货主期望时间内开始服务,只能由即期市场上的程租船 3、4 运输.

由于航速决定燃油成本的高低和航行时间的长短,通过调整航速,船舶 2 从港口 6 到港口 7 的航行

时间( $T$ )由原来的 6 d 变为 4 d,因此船舶 2 可以及时到达第 4 票货物的装货港,如图 2 所示. 同时,在实际情况下,由于航线距离长,海上不确定因素多,船舶晚于货主期望时间到达港口是常有情况. 当货主放宽对货物装卸时间窗要求,在模糊时间窗下,船舶 1 可以在货主可容忍的服务时间范围内对第 3 票货物进行服务. 此时船舶调度计划可以减少使用两艘程租船舶. 因此本文从船公司角度出发,不仅注重通过优化航速提升船公司营运收益,而且兼顾货主满意度对船舶调度计划的影响,全面考虑货物、港

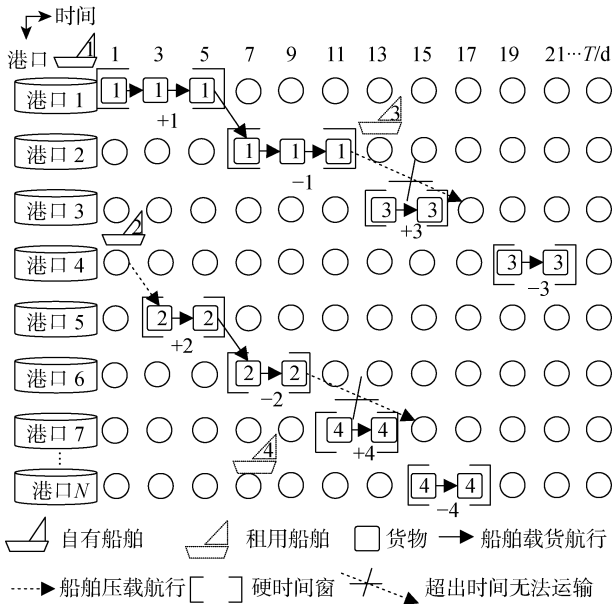


图 1 硬时间窗下航速不变船舶调度计划

Fig. 1 Ship schedule with fixed speed and hard time window

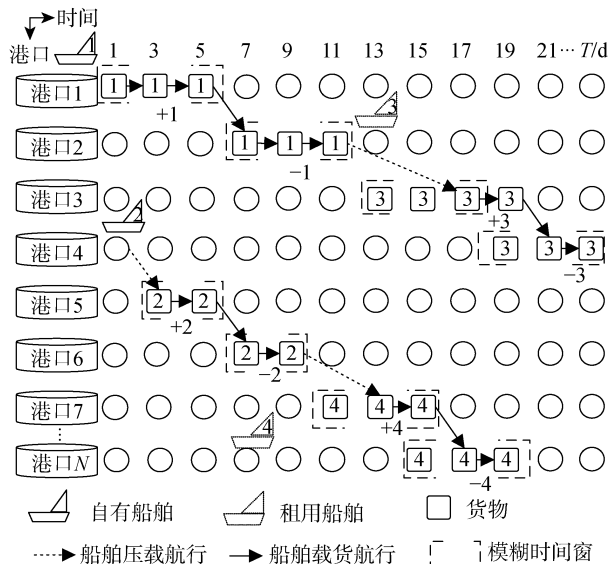


图 2 模糊时间窗下航速可变船舶调度计划

Fig. 2 Ship schedule with variable speed and fuzzy time window

口、航线、多船型对成本、运费收入等经济参数的影响,研究船舶在给定运输网络上的最佳调配使用问题. 主要决策涉及制定船舶调度方案,计算最佳航速和船舶配置情况.

## 1.2 基本假设

为便于建立模型,参考文献[11,24]做出以下假设:

(1) 假设船公司拥有多种船型,每一种船型对应船舶载重量、航速、吃水等参数均不相同;

(2) 船舶每次只能运输一票货物,中间不能加装其他货物,对于待运输货物允许船公司选择自有船舶运输或在即期市场上通过租船方式运输;

(3) 提前可以确定每一票货物的装货港、卸货港,装卸货时间要求等相关信息;

(4) 船舶从任意港口或者航行中某个位置出发,按照所承运的货物装货港来确定初始位置,并且完成一个航次后不必返回初始港口;

(5) 假设燃油价格不随时间变化.

## 1.3 符号说明

模型中船舶  $k$  对应的运输子网络为  $(N_k, A_k)$ , 其中  $N_k = N_k^P \cup N_k^D \cup o(k) \cup d(k)$  是船舶  $k$  在运输网络中可访问的节点,包括  $N_k^P$  为船舶  $k$  能够挂靠的装货节点集合,  $N_k^D$  为船舶  $k$  能够挂靠的卸货节点集合,  $o(k)$  为第  $k$  艘船舶出发时所在位置(可能是在港口也可能在航行中某个位置),  $d(k)$  为第  $k$  艘船舶完成最后一批货物运输所在的位置.  $Q_k$  表示船舶  $k$  最大载重量,  $q_i$  表示货物  $i$  的货量,  $[EET_i, ET_i, LT_i, ELT_i]$  是节点  $i$  的模糊时间窗,即在节点  $i$  的期望时间窗  $[ET_i, LT_i]$  的基础上增加最大容忍下限  $EET_i$  和最大容忍上限  $ELT_i$ ,  $EET_i$  是节点  $i$  最早可以开始接受船舶服务的时刻,  $ELT_i$  是节点  $i$  最晚可以开始接受船舶服务的时刻.  $t_{ik}$  是船舶  $k$  在节点  $i$  处装卸货物所用时间,  $C_{ik}^e$  是自有船舶  $k$  在  $ET_i$  之前到达节点  $i$  的单位时间等待成本,  $C_{ik}^l$  是自有船舶  $k$  在  $LT_i$  之后到达节点  $i$  的单位时间延误成本,  $C_{ik}^p$  是自有船舶  $k$  在节点  $i$  产生的港口成本,此成本包括船舶作业成本及非生产性停泊成本.  $C_i$  表示节点  $i$  处货物通过在即期市场租船运输所产生的成本,  $C_{ijk}$  表示船舶从节点  $i$  到节点  $j$  的航行成本.  $d_{ij}$  表示从节点  $i$  至节点  $j$  的航行距离,船舶  $k$  压载航行速度范围  $[v_{b,k}^{\min}, v_{b,k}^{\max}]$ , 船舶  $k$  载货航行速度范围  $[v_{l,k}^{\min}, v_{l,k}^{\max}]$ ,  $p_f$  为燃油价格,  $u_k$  为船舶燃油消耗系数.

$w_{ik}$  为当离开节点  $i$  时船舶  $k$  上所载货量,  $T_{ik}$  表示船舶  $k$  到达节点  $i$  时刻,  $v_{ijk}$  表示船舶从节点  $i$  航

行至节点  $j$  的速度,所产生的航行成本不仅与船舶燃油消耗有关还与船舶载货量有关,  $\alpha$  为船舶载重量对主机燃油消耗量的影响系数,对于装载航行  $\alpha = 1$ ,对于压载航行  $\alpha = 0.92^{[28]}$ , 计算航行成本方法参考文献[18]  $C_{ijk} = p_f d_{ij} v_{ijk}^2 u_k \alpha$ ,  $x_{ijk}$  表示船舶  $k$  是否从节点  $i$  航行至节点  $j$ , 是为 1, 否为 0.  $Y_i$  表示节点  $i$  处货物是否通过在即期市场上租船完成运输, 是为 1, 否为 0.

## 1.4 模糊时间窗与货主满意度

对于模糊时间窗下船舶调度问题,船舶在港口开始服务时间与货主满意度、时间成本有直接关系. 由于船东过早将货物卸至堆场,货主无法及时组织运力进行提货,因此需要承担货物在码头的堆存费用,并且由于不定期船主要运输大宗散货粮食等,未按照货主期望时间送达将产生货损,对货主造成收益损失,降低货主满意度及船公司信誉度. 采用模糊时间窗可以较好刻画货主满意度与时间关系. 当船舶  $k$  在港口  $i$  期望时间窗  $[ET_i, LT_i]$  内进行服务时,货主满意度为最高值 1,且没有时间成本;当船舶  $k$  在港口  $i$  期望时间窗外,但在模糊时间窗内进行服务时,货主满意度随着偏离货主的期望时间窗的加长呈下降趋势,而时间成本呈上升趋势;当船舶  $k$  在时间窗  $EET_i$  和  $ELT_i$  处服务时,货主的满意度为最低值 0,且时间成本达到最高值;当船舶  $k$  超出模糊时间窗  $[EET_i, ET_i, LT_i, ELT_i]$  到达港口  $i$  时,则货主不接受此票货物.

本文假设时间成本的最高值为  $C_i$ ,  $S(T_{ik})$  是在  $T_{ik}$  时刻船舶  $k$  在港口  $i$  准备接受服务时货主的满意度,  $C_i(T_{ik})$  是船舶  $k$  在  $T_{ik}$  时刻在港口  $i$  准备接受服务所产生的时间成本. 货主满意度  $S(T_{ik})$  和时间成本  $C_i(T_{ik})$  的变化趋势如图 3~4 所示. 根据实际情况,可看出货主对于船舶过早将货物送达的容忍度将高于船舶晚于货主期望时间的容忍度,因此在  $[EET_i, ET_i]$  时间段内货主满意度与时间线性关系斜率大于在  $[LT_i, ELT_i]$  时间段.

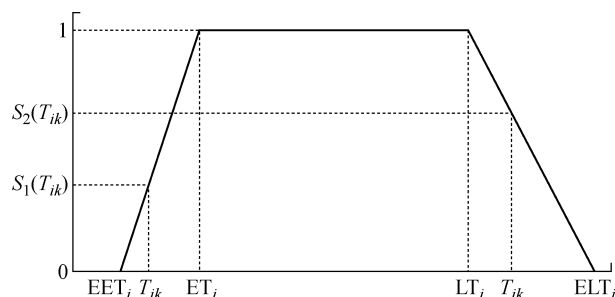


图 3 货主满意度变化趋势

Fig. 3 Variation in shipper satisfaction

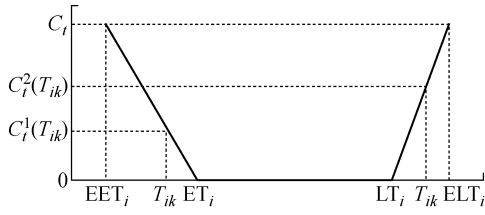


图4 时间成本变化趋势

Fig. 4 Variation in time cost

其中,货主满意度  $S(T_{ik})$  和时间成本  $C_t(T_{ik})$  的计算公式如下:

$$S(T_{ik}) = \begin{cases} S_1(T_{ik}), & EET_i \leq T_{ik} \leq ET_i \\ 1, & ET_i \leq T_{ik} \leq LT_i \\ S_2(T_{ik}), & LT_i \leq T_{ik} \leq ELT_i \\ 0, & T_{ik} \leq EET_i, T_{ik} \geq ELT_i \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_{ik}$  在  $[EET_i, ET_i]$  范围内  $S_1(T_{ik}) = \frac{T_{ik} - EET_i}{ET_i - EET_i}$ ;  $T_{ik}$  在  $[LT_i, ELT_i]$  范围内  $S_2(T_{ik}) = \frac{ELT_i - T_{ik}}{ELT_i - LT_i}$ .

$$C_t(T_{ik}) = \begin{cases} C_t^1(T_{ik}), & EET_i \leq T_{ik} \leq ET_i \\ 0, & ET_i \leq T_{ik} \leq LT_i \\ C_t^2(T_{ik}), & LT_i \leq T_{ik} \leq ELT_i \\ C_t, & T_{ik} \leq EET_i, T_{ik} \geq ELT_i \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_{ik}$  在  $[EET_i, ET_i]$  范围内产生的时间等待成本为  $C_t^1(T_{ik}) = C_{ik}(ET_i - T_{ik})$ ;  $T_{ik}$  在  $[LT_i, ELT_i]$  范围内产生的时间惩罚成本为  $C_t^2(T_{ik}) = C_{ik}(T_{ik} - LT_i)$ .

### 1.5 模型建立

模糊时间窗下多船型不定期船调度与航速联合优化模型如下:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_k} C_{ijk} x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_k} C_{ik}^p x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_k} C_{jk}^e x_{ijk} \max\{(ET_j - T_{jk}), 0\} + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_k} C_{jk}^l x_{ijk} \max\{(T_{jk} - LT_j), 0\} + \sum_{i \in N^P} C_i Y_i \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N_k^P \cup \{d(k)\}} x_{o(k)jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N_k^D \cup \{o(k)\}} x_{id(k)k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N_k} x_{ijk} - \sum_{j \in N_k} x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, i \in N_k / \{o(k), d(k)\} \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N_k} x_{ijk} + Y_i = 1 \quad \forall k \in K, i \in N^P \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N_k} x_{ijk} - \sum_{j \in N_k} x_{j(n+i)k} = 0 \quad \forall k \in K, i \in N_k^P \quad (8)$$

$$x_{ijk} = 0 \quad \forall k \in K, i \in N_k^P, j \in N_k^P \quad (9)$$

$$x_{ijk} = 0 \quad \forall k \in K, i \in N_k^D, j \in N_k^D \quad (10)$$

$$T_{ik} \vee EET_i + t_{ik} + d_{i(n+i)k} / v_{i(n+i)k} = T_{(n+i)k} \quad \forall k \in K, (i,j) \in A_k \quad (11)$$

$$x_{ijk}(T_{ik} \vee EET_i + t_{ik} + d_{ij} / v_{ijk}) = T_{jk} \quad \forall k \in K, (i,j) \in A_k \quad (12)$$

$$T_{jk} \leq ELT_j \quad \forall k \in K, j \in N_k \quad (13)$$

$$x_{i(n+i)k} w_{(n+i)k} = 0 \quad \forall k \in K, i \in N_k^P, (i, n+i) \in A_k \quad (14)$$

$$x_{(n+i)jk}(q_j - w_{jk}) = 0 \quad \forall k \in K, i, j \in N_k^P, (n+i, j) \in A_k \quad (15)$$

$$0 \leq w_{ik} \leq Q_k \quad \forall k \in K, i \in N_k \quad (16)$$

$$v_{b,k}^{\min} \leq v_{ijk} \leq v_{b,k}^{\max} \quad \forall k \in K, i \in N_k / N_k^P, j \in N_k^P \quad (17)$$

$$v_{l,k}^{\min} \leq v_{i(n+i)k} \leq v_{l,k}^{\max} \quad \forall k \in K, i \in N_k^P \quad (18)$$

$$Y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N^P \quad (19)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, (i,j) \in A_k \quad (20)$$

式(3)表示模型的目标是规划期内船公司总成本最小化,包括5部分,第1部分为航行成本,第2部分为港口成本,包括港口使费及在港停泊费用,第3、第4部分为超出货主期望时间产生的等待与惩罚成本,两部分共同构成了时间成本,第5部分为通过租船方式运输货物所产生的租船成本;式(4)表示船舶仅一次从初始位置出发;式(5)表示船舶仅一次到达运输最后一票货物的卸货港;式(6)表示到达与离开任意港口的船舶数量相同;式(7)表示对于待运输的货物可以选择自有船舶运输或者从即期市场上租船运输;式(8)保证船舶的调度计划在挂靠同一货物的装货港和卸货港上保持一致;式(9)、式(10)分别表示船舶不能连续挂靠两个装货港和两个卸货港,即船舶运输一票货物途中不能加装其他货物;式(11)、式(12)分别表示船舶从货物装货港到卸货港的时刻和船舶航行线路与航行时间的一致性,  $\vee$  表示两者之间取最大值;式(13)表示船舶  $k$  服务完港口  $i$  后到达港口  $j$  的时刻不超过最晚开始服务时刻;式(14)、式(15)表示船舶航行线路与船舶载货量之间的关系;式(16)表示船舶运输每一票货物的货量不能超过船舶最大载重量;式(17)、式(18)分别表示船舶压载和载货航行速度可取的范围;式(19)和式(20)表示变量约束。

## 2 模型求解

模糊时间窗下不定期船调度与航速联合优化模

型是一个非线性规划模型,结构与成分较为复杂,同时含有 0-1 变量、连续变量以及等式、不等式混合.针对模型的结构特征本文设计了变邻域遗传模拟退火算法.遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种遵循自然界中适者生存规则和遗传理论而产生一种全局搜索启发式算法,但该算法存在着易早熟、容易陷入局部最优的缺点.变邻域搜索算法(Variable Neighborhood Search, VNS)是一种通过对当前解的不同邻域结构展开一定范围搜索,以获得多样搜

索策略的元启发式算法,相对于遗传算法来说局部搜索能力、深度搜索能力较强.模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)是一种以概率 1 收敛于全局最优解的全局优化算法,具有渐近收敛性、并行性.三者结合能够同时进行局部搜索与全局寻优.算法流程如图 5 所示.其中:Pop\_best 表示当前代最优个体适应度;Global\_best 表示全局最优个体适应度.设置以下参数:迭代次数 Gen;最大迭代次数 Maxgen;种群规模 Popsiz;自适应进化压力系数  $\beta$ .

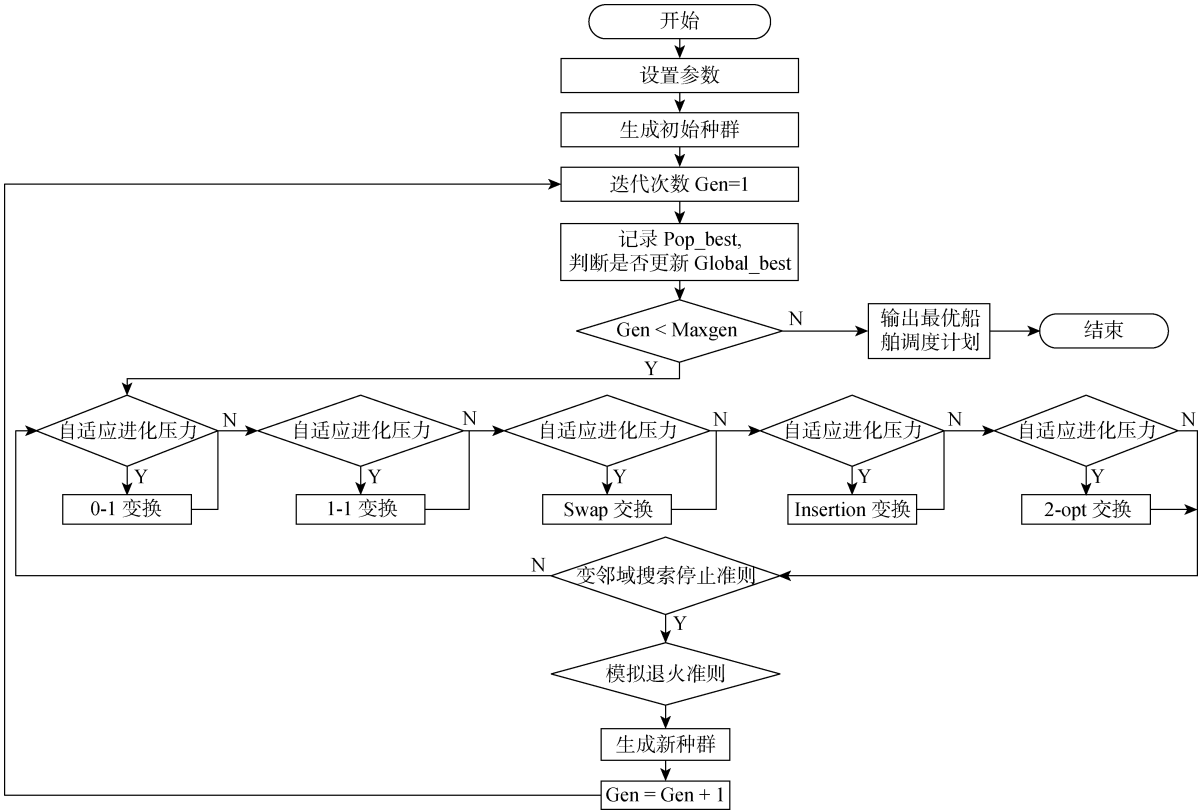


图 5 算法流程图

Fig. 5 Flowchart of the proposed algorithm

2.1 编码与初始种群的生成

算法中解方案采取实数编码方式,染色体长度为货物数量,染色体上基因的位置就是船舶服务货物的顺序.初始种群在船型、时间两个双重约束下生成.具体的方法为:首先将货物与各船型进行匹配,得出每一艘船舶能够运输的货物,构成该船舶的初始航线;再检验每一艘船舶的初始航线是否满足时间约束,即船舶从初始位置出发,按照货物对应的港口编号依次访问,当船舶不能同时满足货物装货港、卸货港的时间窗约束时,将此票货物从该型船舶移除,检验将其插入到其他型船舶能否运输;若该型船舶能够运输此票货物,则将此货物从其他型船舶航线中移除,不再安排船舶运输此票货物.例如共有 3 艘自有船舶,编号为 1-2-3,待运输货物 10 票,1-2-4-

5-3-7-9-8-6-10 为 10 票货物的全排列,构成一条染色体.船舶 1 能够运输货物 {5-8-9-10}, 船舶 2 能够运输货物 {1-2-3-5-8-9-10}, 船舶 3 能够运输货物 {1-2-3-4-5-6-7-8-9-10}, 船舶 1 运输货物 9 后不能满足货物 10 的时间窗约束,则船舶 1 航线为 5-8-9;此时将船舶 2 和船舶 3 生成的初始航线中已被安排运输的 5、8、9 票货物移除,船舶 2 初始航线变为 {1-2-3-10}, 船舶 3 初始航线为 {1-2-3-4-6-7-10}, 再检验船舶 2 是否满足每一票货物装卸港时间窗要求,都能够满足则生成船舶 2 航线 {1-2-3-10};删除船舶 3 初始航线中已被安排运输货物,检验船舶 3 航线能否满足时间窗约束,依次类推,生成初始种群.

2.2 计算适应度

本文染色体的适应度为所有船舶的航行成本、

港口成本、时间成本、租船成本之和,搜索当代种群中的最优个体适应度值,若  $Pop\_best < Global\_best$ ,则记录此代个体对应的船舶调度计划,否则不接受此代个体最优值。

2.3 变邻域搜索策略

在算法的局部搜索策略中引入插入、交换、2-opt 共 3 种变邻域结构产生新的候选解,增强算法的局部搜索能力,避免在寻优过程中陷入局部最优。在进行邻域变换时,为了提高运行效率,缩短程序运行时间,本文引入自适应进化压力  $p = \beta \times \exp\left(\frac{Gen - Maxgen}{Maxgen}\right)$ ,  $\beta = 0.1 \sim 1$ 。根据自适应压力值判

断对邻域结构是否进行扰动。在进化初期,为了保证种群多样性,自适应进化压力较小;在进化后期,为了提高解的质量,快速收敛,自适应进化压力较大。用此变换策略替代传统遗传算法的交叉变异,根据港口之间的距离排序进行有目的邻域搜索,将解的变换向高质量发展。具体邻域结构变换如图 6 所示。当变邻域搜索循环次数达到预设值时,或者采用每一个搜索策略循环多次仍未找到改进解时,则不再进行邻域变换,算法进入下一阶段。

(1) 0-1 邻域变换:在航线 1 随机选择第  $i$  票货物,根据货物装卸港口之间的距离由近到远排序,将

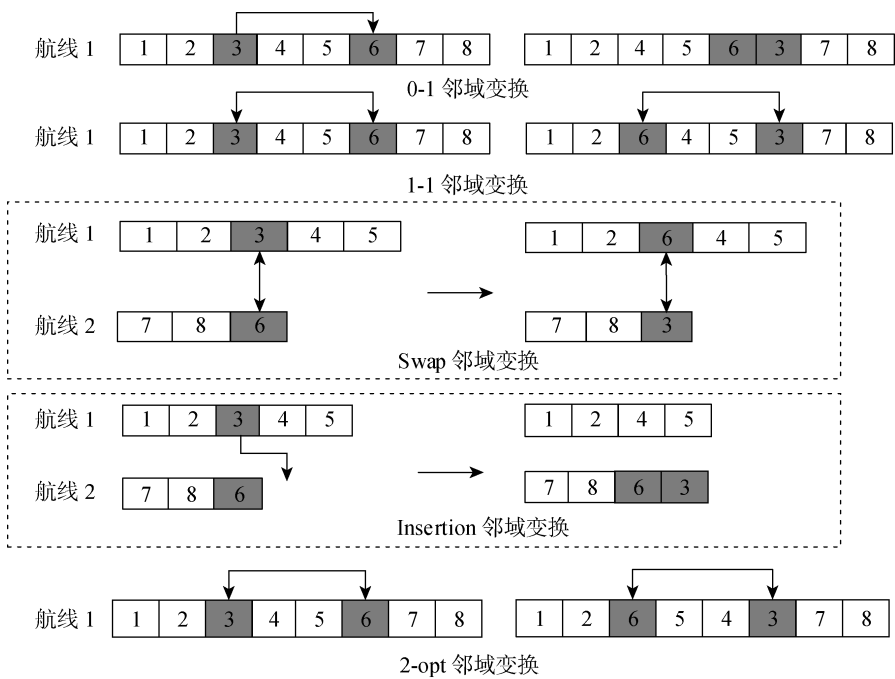


图 6 变邻域搜索策略

Fig. 6 Variable neighborhood search strategy

此票货物插入到航线 1 货物  $j$  后面。

(2) 1-1 邻域变换:在航线 1 上随机选择两票货物  $i, j$ ,直接将两票货物  $i, j$  互换位置。

(3) Swap 邻域变换:分别在航线 1 和航线 2 上随机选择两票货物  $i, j$ ,将货物  $i, j$  从所在航线中分离,交换航线 1 和航线 2 上两票货物位置。

(4) Insertion 邻域变换:分别在航线 1 和航线 2 上随机选择两票货物  $i, j$ ,将航线 1 上的货物  $i$  移除插入到航线 2 货物  $j$  后面。

(5) 2-opt 邻域变换:随机选择航线 1 上的两票货物,将两票货物  $i, j$  之间的货物进行逆序排列。

2.4 解的更新

计算经过邻域变换后子代个体的适应度值,若子代个体优于父代个体,则保留子代个体。否则根据

模拟退火准则,以一定概率  $P = \exp\left(-\frac{Pop\_best - Global\_best}{\lambda \times Maxgen - Gen}\right)$  接受子代个体,提高局部搜索能力,其中  $\lambda = 1.1 \sim 1.3$ 。

3 算例验证及结果分析

3.1 算例描述

为了验证提出的数学模型有效性,本文算例由文献[29]提供的某船公司不定期船舶历史运输数据生成。该算例共有 7 艘自有船舶,船舶参数信息设置如表 1 所示,货物为 30 票大宗散货,需要整船运输,相关货物信息如表 2 所示,时间窗以小时计算。 $p_f$  燃油价格为 590 美元/t。根据文献[30]可知对生产性停泊,船舶停泊费费率为 0.23 元/(t · d);对于非

表 1 自有船舶相关信息  
Tab. 1 Information of self-owned ships

编号	最大载重量/t	初始位置	压载速度/kn		满载速度/kn		已航行时间/h
			下限	上限	下限	上限	
1	13 200	HAMBURG	11	16	11	15. 5	80
2	16 500	MONTOIR DE BRETAGNE	12	17	12	16. 5	116
3	24 000	VIGO	10	15	10	14. 5	0
4	33 200	DUNKIRK	11. 5	15. 5	11. 5	15	34
5	5 800	LA PALLICE	11. 5	16	11. 5	15. 5	0
6	2 950	LA PALLICE	11	15. 5	11	15	0
7	3 570	KLAIPEDA	11	15	11	14. 5	0

表 2 货物信息  
Tab. 2 Cargo information

编号	与货物 不相适船舶	装货港	卸货港	装货港时间窗/h		卸货港时间窗/h		租船运输 成本/美元
				下限	上限	下限	上限	
1	—	GDANSK	RAVENNA	364	436	364	1 017	464 619
2	—	CADIZ	VADO LIGURE	1 096	1 168	1 096	1 592	527 063
3	—	GDANSK	KLAIPEDA	891	963	891	1 292	345 828
4	—	ANTWERP	BRAKE	106	178	106	567	657 530
5	—	ANCONA	CADIZ	258	330	258	784	584 277
6	2,3	ALGECIRAS	ANCONA	72	144	72	572	416 260
7	—	TILBURY	ANTWERP	639	711	639	1 002	679 111
8	—	DUNKIRK	THISVI	1 454	1 526	1 454	2 060	938 250
9	—	VIGO	VADO LIGURE	852	924	852	1 344	552 843
10	—	TALLINN	MO I RANA	1 068	1 140	1 068	1 578	382 307
11	—	ZEEBRUGGE	LIVERPOOL	604	676	604	1 077	223 256
12	—	SINES	MO I RANA	535	607	535	1 038	513 859
13	—	GENOA	GDANSK	490	562	490	1 092	348 556
14	—	BILBAO	LA SPEZIA	932	1 004	932	1 446	299 760
15	2,3,4,5,6,7	GDANSK	TEESPORT	0	72	0	422	664 773
16	—	TEESPORT	HAMBURG	193	265	193	639	179 337
17	2,3	HUELVA	VADO LIGURE	52	124	52	574	653 627
18	—	HUELVA	THISVI	310	382	310	841	294 556
19	2,3,5	VIGO	THISVI	18	90	18	549	680 437
20	—	LAS PALMAS	MO I RANA	996	1 068	996	1 583	304 174
21	2,3,4,5,6,7	GDANSK	THISVI	0	72	0	637	998 137
22	—	CADIZ	KLAIPEDA	1 155	1 227	1 155	1 694	724 428
23	—	VLISSINGEN	DUNKIRK	386	458	386	780	179 492
24	—	CARTAGENA	VADO LIGURE	420	492	420	863	200 682
25	—	GDANSK	ROTTERDAM	322	394	322	834	512 956
26	—	GDANSK	ANCONA	880	952	880	1 496	584 238
27	—	ALGECIRAS	VADO LIGURE	391	463	391	839	256 818
28	—	ORESUND	LISBON	678	750	678	1 196	780 380
29	—	HUELVA	LA SPEZIA	892	964	892	1 369	606 120
30	—	MO I RANA	SINES	520	592	520	1 091	609 947

注：“—”表示没有船舶,不能运输此票货物.

生产性停泊,船舶停泊费费率为 0.15 元/(t·h);由于延误产生的单位费率为 0.30 元/(t·h).

3.2 算法性能分析

在进行实例计算之前,为了验证本文设计的变邻域遗传模拟退火算法 (Variable Neighborhood Genetic Simulated Annealing, VNGSA) 的有效性,

对不定期船舶小规模算例及标准算例进行测试.

3.2.1 小规模算例 针对本文所建模型,生成 2 艘船舶 3 票货物的小规模算例,其中船舶 1 和船舶 2 初始位置在 ROTTERDAM 和 SETUBAL 港口,速度范围为 13~14 kn,货物数据如表 3 所示,进行算例分析.

表 3 小规模算例货物信息  
Tab.3 Small scale cargo information

编号	装货港	卸货港	装货港时间窗/h		卸货港时间窗/h		租船运输成本/美元
			下限	上限	下限	上限	
1	SINES	MONTOIR DE BRETAGNE	289	361	289	722	316 519
2	TALLINN	ANTWERP	0	100	0	459	390 143
3	ZEEBRUGGE	CARTAGENA	36	108	36	527	414 361

通过枚举所有可能的船舶挂靠港口顺序及采取的速度,计算小规模算例最优解.本算例两艘船舶运输 3 票货物,船舶 1 可运输 3 票、2 票、1 票、0 票货物,对应船舶 2 运输 0 票、1 票、2 票、3 票货物,同时考虑自有船舶运输情况,因此共有路径方案 43 种.每一种方案又对应不同航段速度方案,当分别运输 3 票、2 票、1 票货物时,航段速度方案分别有 64 种、16 种、4 种,因此总共有 1 753 种方案.计算每一种调度方案的目标函数值,得出结果为船舶 1 运输货物 2、1,船舶 2 运输货物 3,总成本为 330 785 美元,与本文启发式算法求得最优解一致,证明本文算法有效性,可求解船舶调度与航速联合优化问题.

3.2.2 标准算例 采用标准算例测试算法性能,标准算例来源于 <http://iot.ntnu.no/users/lars-mahv/benchmarks/>.此算例是一个求解硬时间窗下多船型不定期船调度问题,其中成本组成有船舶航行成本、货物未被运输所产生的成本,约束条件有港口时间窗,船舶容量等.标准算例与本文不同在于没有航速约束以及时间成本.采用 MATLAB 2016a 编译程序运行(电脑操作系统为 Windows 10,运行内存为 8 GB,CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7-7700,主频为 3.60 GHz).

选取标准算例中小规模、中等规模、大规模算例各 5 组,共 15 组.其中 C8 代表 8 票货物,需要挂靠 16 次港口,V3 代表 3 艘船舶.每一组算例船队中的船舶性能、初始港口位置等都有所不同.表 4 是本文设计的 VNGSA 算法与 GA 算法对标准算例求解结果的比较.其中: $\eta_{best}$  表示算例已知最优解; $Z$  表示算法所求得最优解; $\epsilon$  为  $Z$  与已知最优解的计算偏差; $\epsilon_{ave}$  表示 15 组算例误差平均值.由于算法参数取决于问题规模,本文对于小规模、中等规模、大规模算

例的种群规模、最大迭代次数取值不同.针对种群规模分别设置为 20~100,100~500,500~1 000,最大迭代次数分别为 15~150,150~300,300~800.

采用本文算法与遗传算法计算 C16\_V6\_3 算例,设置种群规模为 500,最大迭代次数为 300,得到两种算法对比收敛图如图 7 所示.根据收敛图可以看出在同样的种群规模与迭代次数下,本文所设计的算法与遗传算法相比收敛速度较快,能够较快获得问题的最优解.

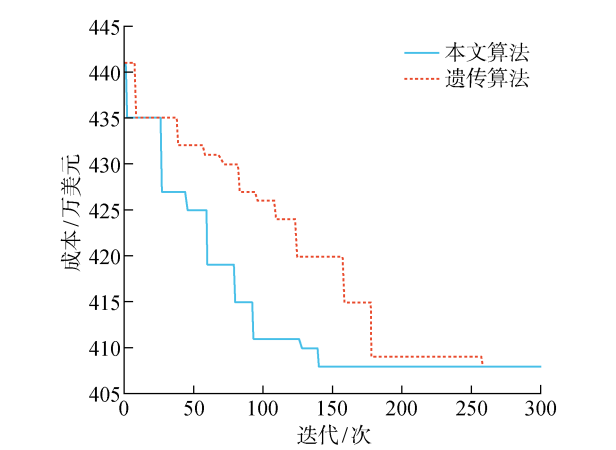


图 7 算法收敛图对比图  
Fig.7 Comparison of algorithm convergence

通过表 4 可以看出对于小规模和中等规模问题本文算法能够求出与算例已知最优解相同结果.将两种算法对比分析,GA 算法求解出 15 组算例中 7 个最优解,而本文算法求解出 15 组算例中 11 个最优解,两种算法求得结果与已知最优解的计算偏差平均值分别为 2.99%、1.13%.可以看出本文算法求得结果误差较小,这表明本文算法寻优能力较强,具有良好的求解性能.

表 4 标准算例结果比较  
Tab. 4 Comparison of standard example results

算例	$\eta_{best}$	GA		VNGSA	
		Z	$\epsilon/\%$	Z	$\epsilon/\%$
C8_V3_1	1 391 997	1 391 997	0.00	1 391 997	0.00
C8_V3_2	1 246 273	1 246 273	0.00	1 246 273	0.00
C8_V3_3	1 698 102	1 698 102	0.00	1 698 102	0.00
C8_V3_4	1 777 637	1 777 637	0.00	1 777 637	0.00
C8_V3_5	1 636 788	1 636 788	0.00	1 636 788	0.00
C16_V6_1	3 577 005	3 642 887	1.84	3 577 005	0.00
C16_V6_2	3 560 203	3 560 203	0.00	3 560 203	0.00
C16_V6_3	4 081 013	4 081 013	0.00	4 081 013	0.00
C16_V6_4	3 667 080	3 718 542	1.40	3 667 080	0.00
C16_V6_5	3 438 493	3 476 347	1.10	3 438 493	0.00
C35_V13_1	2 986 667	3 531 066	18.23	3 252 532	8.90
C35_V13_2	3 002 974	3 147 092	4.80	3 002 974	0.00
C35_V13_3	3 084 339	3 226 146	4.60	3 149 614	2.12
C35_V13_4	3 952 461	4 202 921	6.34	4 093 356	3.56
C35_V13_5	3 293 086	3 507 983	6.53	3 370 315	2.35
$\epsilon_{ave}$	—	—	2.99	—	1.13

3.3 算例计算分析

通过算法性能分析证明了本文算法有效性,因此采用此算法求解模糊时间窗下船舶调度与航速联合优化模型.设置货主可容忍船舶到达时间上下限

为 50 h,计算结果如表 5 所示.

通过计算可见船队中自有船舶没有闲置,总共有 28 票货物通过自有船舶运输,仅剩余 2 票货物需要租船运输.

表 5 模糊时间窗下船舶调度与航速联合优化  
Tab. 5 Ship schedule and speed optimization problem with fuzzy time window

船号	船舶运输货物编号	航段采用速度/kn
1	21-13	[13.4,11.3],[13.1,11.6]
2	4-1-9	[16.5,15.0],[15.8,15.9],[12.6,12.5]
3	16-24-29-2	[12.7,11.5],[11.2,12.4],[14.4,10.4],[11.7,10.6]
4	19-5-12-10	[14.7,12.6],[15.3,14.1],[15.4,11.9],[13.0,13.9]
5	25-23-30-3-26	[13.6,11.6],[15.3,12.4],[12.8,13.4],[12.3,13.8],[15.1,13.3]
6	6-28-20-8	[12.2,11.3],[14.9,13.0],[13.7,11.3],[14.9,12.0]
7	17-27-7-11-14-22	[13.3,13.3],[12.3,14.4],[11.2,13.6],[13.5,11.5],[12.5,12.6],[12.4,11.3]
租船	15-18	—
总成本/美元		4 735 125

3.3.1 方案有效性分析 为验证本文方案的有效性,采用 3 种不同的方案对 3.1 算例进行计算,各方案对比分析求得结果如表 6 所示.方案 1 为硬时间窗下船公司采用固定航速制定船舶调度计划;方案 2 是在方案 1 基础上采用航速可变策略;方案 3 是基于模糊时间窗,制定航速可变的不定期船调度方案,即本文所研究的模糊时间窗下船舶调度与航速

表 6 3 种方案对比  
Tab. 6 Comparison of three programs (万美元)

方案	航行成本	港口成本	时间成本	租船成本	总成本
1	175.09	187.09	—	237.37	599.55
2	154.54	185.34	—	237.37	577.25
3	196.82	158.41	22.35	95.93	473.51

联合优化.

通过表格可以看出,将方案 1 与方案 2 各项成本对比分析发现,采取航速优化能够降低航行成本 11.7%,而所花费的港口成本相近,租船成本相同,最终航速优化方案能够降低总成本 22.30 万美元.将方案 3 与方案 2 对比,由于货主对时间的敏感性降低,自有船舶调度计划中可以运输更多货物,造成航行成本由于货物多为自有船舶运输而有所升高,但租船成本降低 59.6%,最终总成本与方案 2 相比

降低 17.97%,与方案 1 相比降低 21.02%.由此可见模糊时间窗下不定期船调度与航速联合优化能够降低航运企业成本,增加营运收益,提高货主满意度.

**3.3.2 航速策略分析** 为了检测船舶调度过程中采用不同的航速策略对航运企业经济效益的影响.本文对船舶航行过程中最大航速、固定航速和本文的可变航速策略进行分析.其中每艘船舶固定航速平均为 14.97 kn.表 7 为 3 种航速策略得到各项成本的对比.

表 7 航速策略对比  
Tab.7 Comparison of speed strategy (万美元)

航速策略	船舶	船舶调度计划	航行成本	港口成本	租船成本	总成本
最大航速	1	25-30-9-2	227.17	187.06	207.92	622.15
	2	27-7-3-10				
	3	16-23-11-29				
	4	1				
	5	17-24-12-14-22-8				
	6	19-5-28-26				
	7	4-18-13-20				
	租船	6-15-21				
固定航速	1	16-1	175.09	187.09	237.37	599.55
	2	25-28-9-2				
	3	30-20				
	4	4-23-11-10				
	5	17-27-12-14-22-8				
	6	19-5-7-3-26				
	7	24-13-29				
	租船	6-15-18-21				
可变航速	1	16-1-20	154.54	185.34	237.37	577.25
	2	25-30-14				
	3	23-11				
	4	4-7-10				
	5	17-12-29-2				
	6	19-5-27-13-3-26				
	7	24-28-9-22-8				
	租船	6-15-18-21				

通过表 7 能够了解到航运企业若一直采用最大航速,虽然能够通过自有船舶运输更多的货物,降低租船成本,但是由于高速行驶产生的航行成本比采用可变航速产生的航行成本高 72.63 万美元,远远超过节省的租船成本,因此是各航速策略中总成本最高的一种策略.若航运企业采取固定航速,自有船舶能够运输的货物与可变航速运输货物数量同样

多,但由于航速单一,造成航行成本及港口成本都高于可变航速下所对应的成本,最终总成本高于可变航速总成本 3.86%.因此船舶在航行过程中,采取可变航速对于航运企业是一个较好的选择,能够压缩成本,达到经济效益最优.

3.4 敏感性分析

考虑到本文的目标值主要受燃油价格、货主满

意度的影响,以 3.1 算例为基础,设计了燃油价格不同和满意度参数变化的敏感性分析实验,将各项成本变化进行对比.

**3.4.1 燃油价格敏感性分析** 设置燃油价格步长 100 美元,共 5 组数据,各项成本变化趋势如图 8 所示,从图中可以看出,随着燃油价格的上涨,航行成本不断增加,租船成本也随之增加,这是由于过高的燃油成本使部分货物通过自有船舶运输已无法获得较大收益,所以采用租船运输方式.最终随着燃油价格的不断上涨,航运企业总成本不断攀升.

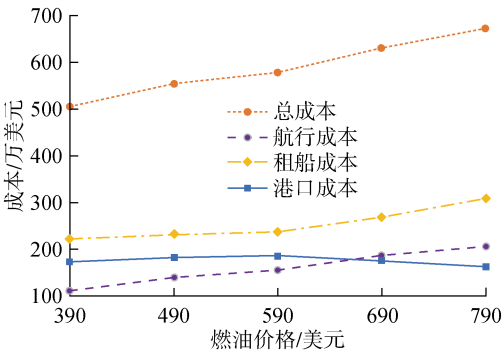


图 8 燃油价格参数敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of fuel price parameter

**3.4.2 货主满意度敏感性分析** 对货主满意度进行分析,设置货主满意度以 0.1 的步长逐渐增长到 1.0.表 8 给出了不同货主满意度下产生的航行成本,港口成本,时间成本,租船成本以及总成本.

从表 8 可以看出,随着货主满意度升高,船舶时间成本呈递减趋势,在  $S(T_{ik})=0.1$  时,船舶时间成本最高,达到 24.17 万美元,但随之租船成本降低,货物多由自有船舶运输;当  $S(T_{ik})=1.0$  时,货主满意度都为最高值 1.0,没有时间成本,但总成本最高.由此说明,随着货主对时间要求越来越高,船公司自有船舶运输货物数量会有所减少,造成租船成本升高;同样船公司总成本随着货主满意度值升高而增加,若想降低船公司的总成本,则会使货主满意度降低;若偏注重保障货主满意度,则会增加航运企业成本,因此需要船公司权衡货主满意度与自身的经济效益,船公司可以根据货主对于时间的敏感性调整航速,对于需要长期合作的货主,可以适当采取加速策略,以保证在货主期望时间内完成货物运输;对于短期合作的货主,船公司可以更加注重自身的经济效益,采取一定策略适当延迟 1-2 天保证货物送达同时船公司保持良好信誉度.

表 8 货主满意度敏感性分析

Tab. 8 Sensitivity analysis of shipper satisfaction

(万美元)

$S(T_{ik})$	航行成本	港口成本	时间成本	租船成本	总成本	租船运输货物
0.1	187.99	150.66	24.17	117.75	480.57	16,21
0.2	179.30	160.44	21.84	164.21	525.79	1,16,21
0.3	160.94	159.36	16.06	195.75	532.11	15,21,23
0.4	159.78	153.62	15.51	213.70	542.61	15,18,21,23
0.5	163.69	151.89	15.36	215.81	546.75	15,18,21,24
0.6	153.96	154.52	14.90	227.99	551.37	6,15,21,24
0.7	151.19	153.31	14.64	250.77	569.91	1,15,21,23,24
0.8	151.37	168.40	14.54	236.01	570.32	11,15,16,18,21
0.9	153.73	172.35	13.30	237.37	576.75	6,15,18,21
1.0	154.54	185.34	—	237.37	577.25	6,15,18,21

4 结论

本文针对不定期船调度与航速联合优化问题,考虑货主满意度、自有船舶与租用船舶配置情况、航速等因素对船舶调度计划的影响,构建了以船公司总成本最小为目标的模糊时间窗下多船型不定期船调度与航速优化模型,提出一种变邻域遗传模拟退火算法对其进行求解,通过算例验证了模型和算法的有效性.结果表明:将船舶调度与航速联合优化能

够降低航行成本;注重货主对时间的敏感性,能够提高货主满意度;所提算法先将船型与货物匹配,再根据时间约束生成路径,最后采用邻域搜索策略提高求解质量;当租用船舶费用远远高于航行成本时,船公司可以通过提高航速增加自有船舶运输货物数量,减少在即期市场上租用船舶;当航行成本过高时,可以增加租用船舶运输货物,减少自有船舶产生的航行成本.

研究成果不仅能深化不定期船调度的理论研

究,也为切实解决船公司面临的船舶调度与航速联合优化问题提供理论指导和决策依据。未来的研究可侧重于船舶在动态环境下的实时调度问题,当出现即期货物时,船公司考虑货主满意度的同时,如何配置船舶、优化航速运输更多货物。

# 参考文献:

- [1] JETLUND A S, KARIMI I A. Improving the logistics of multi-compartment chemical tankers[J]. **Computers and Chemical Engineering**, 2004, 28: 1267-1283.
- [2] FAGERHOLT K. Ship scheduling with soft time windows: An optimisation based approach[J]. **European Journal of Operational Research**, 2001, 131(3): 559-571.
- [3] BRONMO G, CHRISTIANSEN M, FAGERHOLT K, *et al.* A multi-start local search heuristic for ship scheduling—A computational study[J]. **Computers & Operations Research**, 2007(34): 900-917.
- [4] KORSVIK J E, FAGERHOLT K, LAPORTE G. A tabu search heuristic for ship routing and scheduling[J]. **Journal of the Operational Research Society**, 2010, 61(4): 594-603.
- [5] FAGERHOLT K, HVATTUM L, TROND A, *et al.* Routing and scheduling in project shipping[J]. **Annals of Operations Research**, 2013, 207(1): 67-81.
- [6] HEMMATI A, STALHANE M, HVATTUM L M. An effective heuristic for solving a combined cargo and inventory routing problem in tramp shipping. **Computer Operation Research**, 2015, 64: 274-282.
- [7] ARMAS J, LALLA E, CHRISTOPHER E, *et al.* A hybrid GRASP-VNS for ship routing and scheduling problem with discretized time windows[J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2015, 45: 350-360.
- [8] KORSVIK J E, FAGERHOLT K. A tabu search heuristic for ship routing and scheduling with flexible cargo quantities[J]. **Journal of Heuristics**, 2010, 16(2): 117-137.
- [9] BRØNMO G, NYGREEN B, LYGGAARD J. Column generation approaches to ship scheduling with flexible cargo sizes[J]. **European Journal of Operational Research**, 2010, 8: 139-150.
- [10] MENG Q, WANG S A, CHUNG-YEE L. A tailored branch-and-price approach for a joint tramp ship routing and bunkering problem[J]. **Transportation Research Part B**, 2015, 72: 1-19.
- [11] LIN D Y, LIU H Y. Combined ship allocation, routing and freight assignment in tramp shipping[J]. **Transportation Research Part E**, 2011, 47: 414-431.
- [12] YU B, PENG Z X, TIAN Z H, *et al.* Sailing speed optimization for tramp ships with fuzzy time window[J]. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, 2019, 31: 308-330.
- [13] THAI V, TAY W, TAN R, *et al.* Defining service quality in tramp shipping: Conceptual model and empirical evidence[J]. **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, 2014, 30(1): 1-9.
- [14] LEE C Y, LEE H L, ZHANG J. The impact of slow ocean steaming on delivery reliability and fuel consumption[J]. **Transportation Research Part E**, 2015, 76: 176-190.
- [15] MAILLIDIS I, IAKOVOU E, DEKKER R, *et al.* The impact of slow steaming on the carriers' and shippers' costs: The case of a global logistics network[J]. **Transportation Research Part E**, 2018, 111: 18-39.
- [16] NORSTAD I, FAGERHOLT K, LAPORTE G. Tramp ship routing and scheduling with speed optimization[J]. **Transportation Research Part C**, 2011, 19: 853-865.
- [17] HVATTUM L M, NORSTAD I, FAGERHOLT K, *et al.* Analysis of an exact algorithm for the vessel speed optimization problem[J]. **Networks**, 2013, 62(2): 132-135.
- [18] HARILAOS, PSARAFTIS, CHRISTOS. Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios[J]. **Transportation Research Part C**, 2014, 44: 52-69.
- [19] FAGERHOLT K, LAPORTE G, NORSTAD I. Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes[J]. **Journal of the Operational Research Society**, 2010, 61: 523-529.
- [20] 唐磊, 谢新连. 带时间窗约束的不定期船航速优化模型[J]. **物流技术**, 2014, 33(03): 132-135.  
TANG Lei, XIE Xinlian. Study on irregular vessel velocity optimization model with time window constraint[J]. **Logistics Technology**, 2014, 33(03): 132-135.
- [21] 殷翔宇, 张俊, 谢新连. 不定期船最佳航速优化研究[J]. **中国航海**, 2012, 35(01): 94-97+118.  
YIN Xiangyu, ZHANG Jun, XIE Xinlian. Research on the optimal speed of tramp vessels[J]. **Navigation of China**, 2012, 35(01): 94-97+118.
- [22] 李铮, 潘晓萌. 船舶航速优化算法研究[J]. **舰船科学技术**, 2016, 38(12): 7-9.  
LI Zheng, PAN Xiaomeng. Research on optimization algorithm of ship speed[J]. **Ship Science and Technol-**

- ogy, 2016, 38(12): 7-9.
- [23] WEN M, D PACINO, KONTOVAS, *et al.* A multiple ship routing and speed optimization problem under time, cost and environmental objectives[J]. **Transportation Research Part D**, 2017, 52: 303-321.
- [24] WEN M, ROPKE S, PETERSEN H L, *et al.* Full-shipload tramp ship routing and scheduling with variable speeds[J]. **Computers & Operations Research**, 2016, 70: 1-8.
- [25] 唐磊, 谢新连, 王成武. 基于集合划分的航速可变不定期船舶调度模型[J]. **上海交通大学学报**, 2013, 47(06): 909-915.
- TANG Lei, XIE Xinlian, WANG Chengwu. Model of tramp ship scheduling with variable speed based on set partition approach[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2013, 47(06): 909-915.
- [26] 俞超, 王志华, 高鹏. 考虑速遣费和滞期费的不定期船航速优化研究[J]. **交通运输系统工程与信息**, 2018, 18(03): 195-201.
- YU Chao, WANG Zhihua, GAO Peng. Speed optimization considering dispatch and demurrage of the tramp shipping[J]. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, 2018, 18(03): 195-201.
- [27] 李晓君, 谢新连. 重大件运输的货物分配与航速联合优化[J]. **西南交通大学学报**, 2015, 50(04): 747-754.
- LI Xiaojun, XIE Xinlian. Integrated optimization of cargo distribution and ship speed for heavy-cargo transportation[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2015, 50(04): 747-754.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7187.1-2010: 运输船舶燃油消耗量. 第1部分: 海洋船舶计算方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 7187.1-2010: Fuel oil consumption for transportation ships. Part 1: Calculation method for marine ships [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [29] HEMMATI A, HVATTUM L M, NORSTAD I, *et al.* Benchmark suite for industrial and tramp ship routing and scheduling problems[J]. **Information Systems and Operational Research**, 2014, 52(01): 28-38.
- [30] 中华人民共和国交通部港口收费规则(外贸部分)(修正). 中华人民共和国交通部令第11号[S]. 北京: 交通运输部, 2001.
- Rules of the Ministry of Transport of the People's Republic of China on Port Charges (Foreign Trade section) (Amendment). Order of the Ministry of Transport of the People's Republic of China No. 11 [S]. Beijing: Ministry of Transport, 2001.
- (本文编辑: 王一凡)