文章编号:1000 - 4653(2026)04 - 0088 - 10

考虑碳排放的多港区异构拖轮调度优化研究

初良勇[1,2*], 林嘉辰[1], 张一鸣[1]
(1. 集美大学 航海学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建航运研究院, 福建 厦门 361021)

摘 要:随着港口设备的绿色转型,拖轮调度问题面临着新的机遇与挑战。一方面新能源拖轮的投用有利于降低港口作业成本与碳排放量,另一方面当前针对新能源拖轮的研究较为匮乏。针对这一研究局限,根据混合动力拖轮的特征,以船舶在港成本、拖轮作业成本及碳排放成本最小化为目标构建了多港区背景下的异构拖轮调度混合整数线性规划模型。针对模型的特点,采用嵌入特定启发式规则的多元宇宙优化(MVO)算法进行求解,在小规模算例上通过与 Gurobi 对比验证了算法的有效性与准确性,在大规模算例求解中平均可求出优于遗传算法(GA)与改进遗传算法(IGA)4% 与 3.25% 的目标值。研究结果显示:配置大功率的拖轮可有效降低船舶在港成本与拖轮作业成本,但大功率拖轮数量过多时会相对增加拖轮的作业成本,此时适当配置较小功率的拖轮可以发挥出其作业成本低的优势;有效配置一定数量的混合动力拖轮可以降低总调度成本及拖轮碳排放成本,同时拖轮碳排放成本所占作业成本的比例可以从 8% 不断降低至约 1.51%。

关键词:绿色航运;拖轮调度;多元宇宙优化算法;混合动力拖轮;混合整数线性规划模型
中图分类号:U691 + .3 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1000 - 4653.2026.04.010

Research on optimization of multi-port area heterogeneous tugboat scheduling considering carbon emissions

Chu Liangyong[1,2*], *Lin Jiachen*[1], *Zhang Yiming*[1]
(1. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;
2. Shipping Research Institute of Fujian Province, Xiamen 361021, China)

Abstract: With the green transformation of port equipment, tugboat scheduling faces new opportunities and challenges. On the one hand, the deployment of new energy tugboats helps reduce port operating costs and carbon emissions; on the other hand, research on new energy tugboats remains relatively scarce. To address this research gap, a mixed-integer linear programming model for heterogeneous tugboat scheduling under the context of multiple port areas is established based on the characteristics of hybrid tugboats, aiming to minimize port costs, tugboat operation costs, and carbon emission costs. To solve the model, a Multi-Verse Optimization algorithm embedded with heuristic rules is applied, and its effectiveness and accuracy are verified through comparison with the Gurobi solver. In large-scale instances, the proposed algorithm achieved objective values that were, on average, 4% and 3.25% better than those obtained by the GA and IGA, respectively. The research results show that configuring high-power tugboats can effectively reduce ship port costs and tugboat operation costs. However, when the number of high-power tugboats is too large, it may increase operation costs, and at this point, appropriately configuring lower-power tugboats can leverage their low operation cost advantage. An appropriate configuration of a certain number of hybrid tugboats can effectively reduce the total scheduling cost as well as the carbon emission cost of tugboat operations. Meanwhile, the proportion of carbon emission costs in the overall operational cost can be continuously reduced from 8% to approximately 1.51%.

收稿日期:2026-01-15
基金项目:国家社会科学基金项目(24BGL282)资助
第一作者(*通信作者):初良勇(1973—),男,教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理,(E-mail)chuliangyong@163.com
引用格式:初良勇,林嘉辰,张一鸣. 考虑碳排放的多港区异构拖轮调度优化研究[J]. 中国航海,2026,49(4):88 - 97.
Chu L Y, Lin J C, Zhang Y M. Research on optimization of multi-port area heterogeneous tugboat scheduling considering carbon emissions [J]. Navigation of China, 2026, 49(4): 88 - 97. (in Chinese)

Key words: green shipping; tugboat scheduling; multi-verse optimization algorithm; hybrid tugboat; mixed integer linear programming model

随着海运供应链的不断发展,全球港口的作业量呈现出稳步增长的趋势。在这一背景下,拖轮调度显得尤为重要,拖轮作为港口作业的关键设备,承担着引导船舶进出港口、保障航道安全、提升船舶靠泊效率等重要任务。合理的拖轮调度对于保障航运链条的顺畅与高效运作至关重要。

拖轮调度的研究基础源于传统燃油拖轮调度问题,早期的研究多聚焦于优化拖轮的作业效率,徐奇等[1]以船舶在港时间最小化为目标建立了多停泊基地下的拖轮调度优化模型;刘志雄等[2]以拖轮最大作业时间最小化为目标构建了单向航道下的动态拖轮调度模型;蔡芸等[3]建立了拖轮与泊位的联合调度模型以最小化船舶总在港时间与总拖期;Kang 等[4]考虑了船舶到达时间与拖轮作业时间的不确定性以最小化拖轮的总加权服务时间。由于拖轮作业必然会产生一定的成本,后续的多数研究考虑了拖轮作业的燃油成本或行驶成本以更贴近实际运营需求,王巍等[5]建立了以最小化拖轮最大完工时间和总油耗为目标的多目标拖轮调度模型;Zhen 等[6]以拖轮总行驶成本及任务延迟成本最小为目标研究了位于河口港的拖轮与驳船的调度问题; Wei 等[7]提出了一种具有多航点的拖轮调度问题以最小化拖轮的总航行成本;Li 等[8]考虑了拖轮作业的不确定性并建立了模糊优化模型。随着绿色港口建设的持续推进,近年来有关研究常常与节能减排趋势相结合。Zhong 等[9]以拖轮节能减排为视角,考虑拖轮需要在多个港区作业的约束,构建了以潮汐港时间窗为背景的多目标拖轮调度模型以实现拖轮最大完工时间及总油耗最小化;Wang 等[10]以环境和经济成本最小为目标建立了拖轮泊位联合调度双层混合整数线性规划模型。但随着节能减排政策的日趋严格,仅仅依靠提升传统燃油拖轮的运营效率显然已无法满足需求。为此,部分港口开始引入新能源拖轮以逐渐取代传统燃油拖轮,针对新能源拖轮调度展开研究显得必要。目前仅施志洋[11]以拖轮碳排放和船舶延误碳排放之和最低为目标建立了纯电动拖轮调度模型,但其仅适用于求解较小规模算例的商用求解器。

从当前针对拖轮调度的模型构建来看,通常具有一定规模的港口均被划分为多个港区并进行统一的管理与协调作业,但近年来对于多港区背景下的拖轮调度研究较少,虽然文献[8]建立了多港区背景下的拖轮调度模型,但该研究是针对特定港口的潮汐时间段展开的。从节能减排的社会发展趋势来看,当前针对新能源拖轮调度的研究多以传统的常规燃油拖轮作为基础,针对新能源拖轮调度的研究仍较为匮乏且缺少针对大规模算例的求解方法。综合以上现有的研究基础,本文首先建立了多港区背景下的异构拖轮调度混合整数线性规划模型,然后针对问题及模型的特点,重新定义了多元宇宙优化(Multi-Verse Optimization,MVO)算法的搜索策略并对算法进行求解。最后以港口拖轮配置为角度通过算例分析为港口运营实践提供了一定的理论与决策参考。

1 问题描述

图 1 描述的是涉及 3 个港区的异构拖轮调度问题,在实际生产中船舶常因港区水深限制或泊位分配等原因需在不同港区进行作业,而港口需为每艘船舶分配拖轮,协助其从锚地到指定港区靠泊以及从泊位离泊至锚地。同时对于分配给船舶靠离泊的拖轮还需满足数量及功率需求。结合图 1 对拖轮的不同作业工况进行分析如下。

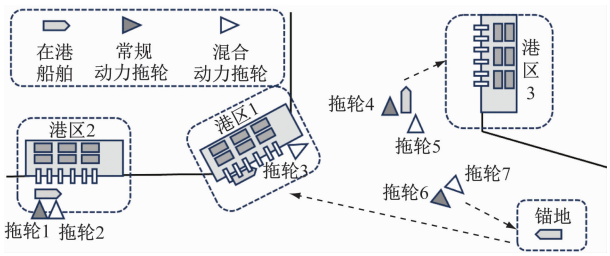


图 1 问题描述

Fig. 1 Problem description diagram

1)自由航行工况。自由航行可定义为拖轮在港口各区域之间空驶的过程,如图 1 中拖轮 6 与拖轮 7 正行驶前往锚地协助到港船舶前往港区 1 进行作业。

2)停泊工况。停泊工况就是拖轮靠泊泊位的过程,如图 1 中的拖轮 3 正停泊于港区 1 中。

3)助泊工况。助泊工况即为拖轮协助船舶靠泊或离泊的过程,助泊工况又可以分为待时与拖拽两种工况[12],拖拽工况即需要拖轮进行高功率输出的阶段,如图 1 中的拖轮 1 与拖轮 2 正拖拽船舶靠泊的过程;待时工况即为助泊作业中的非拖拽时段,如拖轮 4 与拖轮 5 正协助船舶前往港区 3 的过程。

此外,混合动力拖轮同时具备电池及柴油机动力源,在港内行驶及助泊作业中的非拖拽工况可采用电力推进以降低成本,同时不产生碳排放

成本[13]。

2 模型构建

2.1 假设条件

1）各港区均配置有岸电供电设施；

2）拖轮在等待作业期间产生的成本忽略不计[11]；

3）拖轮初始时刻均位于某个港区，混合动力拖轮初始时刻电量为满电状态；

4）混合动力拖轮仅于港内间歇充电，若位于锚地等待则不返回充电。

2.2 模型参数

模型相关参数定义如表 1 与表 2 所示。

表 1 模型参数定义

Tab. 1 Model parameter definition

符号	定义
N	船舶集合，船舶总数 $n=\|N\|$，$i,i'\in N$
M	所有拖轮集合 $m\in M$
C_{M}	常规燃油拖轮集合 $c_{\mathrm{m}}=\|C_{\mathrm{M}}\|$且 $C_{\mathrm{M}}\subseteq M$
X_{M}	混合动力拖轮集合 $x_{\mathrm{m}}=\|X_{\mathrm{M}}\|$且 $X_{\mathrm{M}}\subseteq M$
J	船舶的任务阶段集合 $j\in J=\{1,2\}$
a_i	船舶 i 的到港时间
h_i	船舶 i 的泊位作业时间
b_i	船舶 i 的最迟离港时间
v_i	船舶 i 所需的拖轮等级
l_m	拖轮 m 的等级
p_i	船舶 i 在拖轮协助下前往泊位所需的时间
K	拖轮的任务顺序集合 $k\in K=\{1,2,\cdots,2n\}$
E_{d}	混合动力拖轮的电池容量
$r_{ii'}$	拖轮在船舶 i 与 i'对应的港区之间的行驶时间
r_i	拖轮在船舶 i 港区与锚地之间的行驶时间
r_m	拖轮 m 初始区域与锚地之间的行驶时间
r_{mi}	拖轮 m 初始与船舶 i 港区之间的行驶时间
c_{e}	混合动力拖轮单位时间的充电量
r_{c}	混合动力拖轮充电所需的准备时间
I	单位燃油的碳排放系数
e_m	拖轮 m 单位时间空驶消耗的能耗
c_1	船舶在港停留每个单位时间的费用
c_2	船舶在港等待每个单位时间的费用
c_3	船舶延迟离港每个单位时间的费用
c_4	单位能耗的油耗费用
c_5	单位能耗的电耗费用
c_6	单位碳排放成本
E	一个较大的正数

表 2 模型决策变量定义

Tab. 2 Model parameter definition

符号	定义
x_{ijmk}	船舶 i 的第 j 阶段是拖轮 m 的第 k 个任务时为 1，否则为 0
w_{mk}，u_{mk}	拖轮 m 完成第 k 个任务需要行驶的时间
q_i	船舶 i 的延迟离港时间
s_{ij}	船舶 i 的第 j 阶段作业开始时刻
d_{mk}	拖轮 m 第 k 个任务消耗的电量
c_{mk}	拖轮 m 执行第 k 个任务后的充电时间
D_{mk}	拖轮 m 执行第 k 个任务前的电量
z_{mk}	拖轮 m 执行第 k 个任务后进行充电为 1，否则为 0

2.3 目标函数

1）船舶在港总成本包括船舶在港期间停留产生的成本、船舶等待靠泊或离泊产生的等待成本和船舶延迟离港产生的成本：

$$f_1=\sum_{i\in N}c_1(s_{i2}+p_i-a_i)+\sum_{i\in N}c_2(s_{i2}-a_i-p_i-h_i)+\sum_{i\in N}c_3q_i \tag{1}$$

2）常规动力拖轮作业成本。在此对拖轮的作业成本进行说明，拖轮作业成本主要由航行、待时与拖拽工况下产生的成本构成。其中航行与待时产生的成本与执行任务的次数与地点有关，一旦拖轮开始执行任务无论拖拽船舶的吨位大小都会产生上述的两项成本；而拖轮拖拽船舶的成本与船舶的吨位大小成一定的比例，因此用于拖拽所有船舶的总能耗可以认为是恒定的[6]。基于此，本文计算拖轮作业成本时仅包含航行与待时两种工况的成本。对于常规动力拖轮的燃油成本如式(2)所示，第三项为拖轮执行任务待时工况下产生的能耗，参考有关研究[14]，本文设定拖轮待时产生的能耗与拖轮在锚地与港区之间空驶产生的能耗相同。

$$f_2=\sum_{m\in C_{\mathrm{M}}}\sum_{k\in K}c_4e_m\left(w_{mk}+u_{mk}+\sum_{i\in N}r_i\sum_{j\in J}x_{ijmk}\right) \tag{2}$$

3）混合动力拖轮作业成本。混合动力拖轮产生的作业成本如式(3)所示，其中前半部分代表混合动力拖轮因未消耗电量而产生的燃油成本，后半部分为消耗电量产生的电耗成本。

$$f_3=\sum_{m\in X_{\mathrm{M}}}\sum_{k\in K}c_4e_m\left(w_{mk}+u_{mk}+\sum_{i\in N}r_i\sum_{j\in J}x_{ijmk}-d_{mk}\right)+c_5d_{mk} \tag{3}$$

4)拖轮碳排放成本。碳排放成本即通过所有拖轮在调度期内消耗的燃油量进行估算

$$f_4 = \sum_{m\in C_M}\sum_{k\in K} c_6 Ie_m \left(w_{mk} + u_{mk} + \sum_{i\in N} r_i \sum_{j\in J} x_{ijmk}\right) + \sum_{m\in X_M}\sum_{k\in K} c_6 Ie_m \left(w_{mk} + u_{mk} + \sum_{i\in N} r_i \sum_{j\in J} x_{ijmk} - d_{mk}\right) \tag{4}$$

综上,本文目标函数即为:

$$\min f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \tag{5}$$

2.4 约束条件

在约束条件中,若无进一步补充说明,均有 $\forall i\in N, \forall j\in J, \forall m\in M, \forall k\in K$。

$$s_{i1} \geqslant a_i \tag{6}$$

$$s_{i2} \geqslant s_{i1} + p_i + h_i \tag{7}$$

$$q_i \geqslant s_{i2} + p_i - b_i \tag{8}$$

$$\sum_{m\in M}\sum_{k\in K} x_{ijmk} = 2 \tag{9}$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{j\in J} x_{ijmk} \leqslant 1 \tag{10}$$

$$\sum_{k\in K} x_{ijmk} \leqslant 1 \tag{11}$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{j\in J} x_{ijmk} \geqslant \sum_{i\in N}\sum_{j\in J} x_{ijm(k+1)},\ k\neq 2n \tag{12}$$

$$l_m + E(1 - x_{ijmk}) \geqslant v_i \tag{13}$$

$$s_{i2} + E(2 - x_{i2mk} - x_{i'1m(k-1)}) \geqslant s_{i'1} + p_{i'} + r_{ii'},\ k\neq 1 \tag{14}$$

$$s_{i1} + E(2 - x_{i1mk} - x_{i'1m(k-1)}) \geqslant s_{i'1} + p_{i'} + r_{i'},\ k\neq 1 \tag{15}$$

$$s_{i1} + E(2 - x_{i1mk} - x_{i'2m(k-1)}) \geqslant s_{i'2} + p_{i'},\ k\neq 1 \tag{16}$$

$$s_{i2} + E(2 - x_{i2mk} - x_{i'2m(k-1)}) \geqslant s_{i'2} + p_{i'} + r_i,\ k\neq 1 \tag{17}$$

式(6)确保船舶到港后靠泊;式(7)确保船舶作业结束后离泊;式(8)界定船舶的延迟离港时间;式(9)确保拖轮分配满足数量约束,参考文献[2]本文设定船舶靠离泊均需要两艘拖轮服务;式(10)至式(12)确保拖轮任务分配的唯一性;式(13)确保拖轮满足功率需求;式(14)至式(17)确保拖轮需完成上一个任务并经过行驶才可以进行下一个任务,其中式(14)表示拖轮执行靠泊作业后需跨港区行驶才可以执行离泊任务;式(15)表示拖轮执行靠泊作业后需从港区行驶至锚地才可以执行靠泊任务;式(16)表示拖轮执行离泊作业后即可执行靠泊任务;式(17)表示拖轮执行离泊作业后需从锚地行驶至港区才可以执行离泊作业。

$$E(x_{i'1m(k-1)} + x_{i2mk} - 2) + r_{ii'} \leqslant w_{mk},\ k\neq 1 \tag{18}$$

$$E\left(x_{i'1m(k-1)} + \sum_{i\in N} x_{i1mk} - 2\right) + r_{i'} \leqslant w_{mk},\ k\neq 1 \tag{19}$$

$$E\left(x_{i'2m(k+1)} + \sum_{i\in N} x_{i2mk} - 2\right) + r_{i'} \leqslant u_{mk},\ k\neq 1 \tag{20}$$

$$r_m \sum_{i\in N} x_{i1m1} \leqslant w_{m1} \tag{21}$$

$$E(x_{i2m1} - 1) + r_{mi} \leqslant w_{m1} \tag{22}$$

式(18)至式(22)为拖轮执行每项任务需空驶的时间的计算,其中式(20)为拖轮执行完离泊任务后再执行离泊任务时需要空驶的时间约束,因对于混合动力拖轮而言需要先空驶至港区才可以进行充电,因此需将该空驶时间也计入当前任务的空驶时间;式(21)表示当拖轮的第一项任务为靠泊任务时需要从拖轮所在的港区行驶至锚地;式(22)表示当拖轮的第一项任务为离泊任务时需要跨港区行驶。

$$d_{mk} \leqslant e_m \left(w_{mk} + u_{mk} + \sum_{i\in N} r_i \sum_{j\in J} x_{ijmk}\right),\ \forall m \in X_M \tag{23}$$

$$2 - \sum_{i\in N} x_{i1mk} - \sum_{i\in N} x_{i2m(k-1)} \geqslant z_{m(k-1)},\ \forall m \in X_M,\ k\neq 1 \tag{24}$$

$$s_{i2} + E(2 - x_{i2mk} - x_{i'1m(k-1)}) \geqslant s_{i'1} + p_{i'} + r_{ii'} + c_{m(k-1)} + z_{m(k-1)} r_c,\ \forall m \in X_M,\ k\neq 1 \tag{25}$$

$$s_{i1} + E(2 - x_{i1mk} - x_{i'1m(k-1)}) \geqslant s_{i'1} + p_{i'} + r_{i'} + c_{m(k-1)} + z_{m(k-1)} r_c,\ \forall m \in X_M,\ k\neq 1 \tag{26}$$

$$s_{i1} + E(2 - x_{i1mk} - x_{i'2m(k-1)}) \geqslant s_{i'2} + p_{i'},\ \forall m \in X_M,\ k\neq 1 \tag{27}$$

$$s_{i2} + E(2 - x_{i2mk} - x_{i'2m(k-1)}) \geqslant s_{i'2} + p_{i'} + r_i + c_{m(k-1)} + z_{m(k-1)} r_c,\ \forall m \in X_M,\ k\neq 1 \tag{28}$$

$$D_{m(k+1)} \leqslant D_{mk} + c_e c_{mk} - d_{mk},\ \forall m \in X_M,\ k\neq 2n \tag{29}$$

$$D_{mk} \leqslant E_d,\ \forall m \in X_M \tag{30}$$

$$D_{m1} = E_d,\ \forall m \in X_M \tag{31}$$

$$d_{mk} \leqslant D_{mk},\ \forall m \in X_M \tag{32}$$

$$c_{mk} \leqslant E z_{mk},\ \forall m \in X_M \tag{33}$$

$$q_i, d_{mk}, w_{mk}, u_{mk}, c_{mk} \geqslant 0 \tag{34}$$

式(23)确保拖轮耗电量不大于任务的总能耗;式(24)确保拖轮在锚地等待期间无法由岸电供电;式(25)至式(28)确保混合动力拖轮必须完成上一个任务并经过充电才可以为下一个任务服务;式(29)为拖轮在执行当前任务前的电量约束;式(30)确保电量小于最大电量;式(31)为初始电量约束;式(32)确保拖轮耗电量不大于当前电量;式(33)为拖轮的充电约束。

3 算法设计

拖轮调度问题已被证明是一种 NP-hard 问题，当前针对该问题的求解多采用启发式算法。根据模型的特点，本文尝试采用 MVO 算法进行求解，MVO 是由澳大利亚学者 Seyedali Mirjalili 等[15]于 2016 年提出的一种新型智能优化算法。在 MVO 中主要调节的参数包括虫洞存在可能性(Wormhole Existence Probability，P_{WE})和虫洞旅程距离速率(Travelling Distance Rate，R_{TD})，算法参数较少且易于实现、同时具有较好的全局寻优性能。标准 MVO 针对的是连续性问题，无法将经典 MVO 应用于该问题的求解。因此，本文重新定义了 MVO 的解更新策略并嵌入一种启发式规则对算法进行改进以适用于求解本文模型。

3.1 编码

编码方式为多层整数编码如图 2 所示，图 2 为船舶总数为 3 的一种可行解编码，编码中的第一层与第二层分别为分配给该任务的拖轮编号及所对应的拖轮作业顺序，因到港船舶均需要经过靠泊与离泊作业，因此编码长度为船舶数量的两倍。在第一层中，奇数列和偶数列分别为执行靠泊作业与离泊作业的拖轮编号；在第二层中，每个船舶的靠泊或离泊任务的顺序均是唯一的，每一条拖轮只有在完成任务顺序靠前的任务才会为顺序靠后的任务服务。本文在算法实际搜索过程中只针对拖轮层进行变换操作，对于顺序层则在计算适应度时采取一定的启发式进行求解得出。



图 2 编码方式

Fig. 2 Encoding mode

3.2 适应度

由于实际编码中仅针对拖轮层进行操作，若要得出目标函数值还需要拖轮的作业顺序信息等才可以解出，为此本文设计一种启发式策略来根据编码中的拖轮信息及其他已知参数来求解出拖轮的作业顺序信息及目标函数值，主要步骤如下。

步骤 1：若所有任务均已完成，则结束流程。否则找出所有未服务任务中可以最早开始的任务(即该任务所对应的船舶到港时刻或泊位作业结束时刻的最小值)，将该任务作为当前任务，转入步骤 2。

步骤 2：将该任务的作业开始时刻设为拖轮可以最早为该任务服务的时刻，若为该任务分配的拖轮包含混合动力拖轮即可在任务开始时刻前进行间歇充电。转入步骤 1。

3.3 初始解

本文在初始解的生成过程中设计一种特定的启发式规则生成较优的初始解以改进算法的搜索效率。该规则即在上述计算适应度的步骤中确定出拖轮的作业顺序后根据一定的策略来决定分配给该任务的拖轮编号，该策略即是依次计算所有拖轮可以最快为该任务服务时产生的总成本，而后选择产生成本最小的拖轮分配给该任务。在初始种群中即利用该规则产生一定数量的初始解，用于提升初始种群的质量。

3.4 标准 MVO 算法

MVO 算法中每个宇宙即代表优化问题的一个可行解编码，宇宙膨胀率代表解的适应度，每一次迭代中宇宙个体会根据膨胀率通过白洞转移物体并按概率通过虫洞转移至最优解附近进行搜索，宇宙个体通过虫洞与最优宇宙之间进行物质传输的计算公式为

$$x_{ij}=\begin{cases}\boldsymbol{X}_j+R_{\mathrm{TD}}\times((u_j-l_j)\times r_3+l_j), & r_2<0.5\quad r_1<P_{\mathrm{WE}}\\ \boldsymbol{X}_j-R_{\mathrm{TD}}\times((u_j-l_j)\times r_3+l_j), & r_2\geqslant 0.5\quad r_1<P_{\mathrm{WE}}\\ x_{ij}, & r_1\geqslant P_{\mathrm{WE}}\end{cases}\tag{35}$$

式(35)中，$\boldsymbol{X}_j$ 为最优宇宙的第 j 个变量，x_{ij} 为第 i 个宇宙的第 j 个变量，u_j 与 l_j 分别为第 j 个变量的上下界；r_1，r_2，r_3 均为 0 至 1 的随机数；P_{WE} 与 R_{TD} 的计算公式如下

$$P_{\mathrm{WE}}=\min+t\times\left(\frac{P_{\mathrm{WEmax}}-P_{\mathrm{WEmin}}}{T}\right)\tag{36}$$

$$R_{\mathrm{TD}}=1-\frac{t^{1/6}}{T^{1/6}}\tag{37}$$

式(36)与式(37)中，P_{WEmin} 与 P_{WEmax} 分别为 P_{WE} 的最小值与最大值，t 为当前迭代次数，T 为算法最大迭代次数。

3.5 算法搜索策略

因标准 MVO 算法不能直接求解拖轮调度模型，为此本文根据 MVO 算法的主要思想重新定义算法的搜索策略，设 $\boldsymbol{X}_j$ 为任一宇宙个体，$\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}$ 为当前最优宇宙个体，则 X_i 的位置更新策略如下。

$$\boldsymbol{X}_{i+1}=\begin{cases}\mathrm{Cross}(\boldsymbol{X}_i,\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}},R_{\mathrm{TD}}), & r_1<P_{\mathrm{WE}}\\ \mathrm{Mutation1}(\boldsymbol{X}_i), & r_2<0.5\quad r_1\geqslant P_{\mathrm{WE}}\\ \mathrm{Mutation2}(\boldsymbol{X}_i), & r_2\geqslant 0.5\quad r_1\geqslant P_{\mathrm{WE}}\end{cases}\tag{38}$$

式(38)中,Cross 为宇宙个体采用与最优解进行交叉操作的位置更新方式,对应标准 MVO 中的虫洞位置更新策略;Mutation1 为宇宙个体采取第一种变异操作的位置更新方式;Mutation2 为宇宙个体采取第二种变异操作的位置更新方式。

对于交叉操作策略设定如图 3 所示,首先随机在 1 到 $2n$ 的作业序列中选择交叉起始点,然后向后读取长度为 l 的交叉段用以决定交叉位置信息,若读取至最后一个顺序仍不满足长度要求时,则继续从第一个顺序开始读取,其中 l 的计算公式如式(39)所示,其中 l 为 0 至 1 的随机数。最后依次读取交叉段的顺序信息并将最优宇宙中该顺序位置下的拖轮交叉给当前的宇宙个体。

$$l = n \times (1 - r \times R_{\mathrm{TD}}) \tag{39}$$

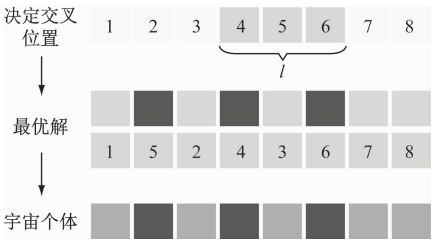


图 3 交叉方式

Fig. 3 Crossing method

对于第一种变异操作策略设定如图 4 所示,首先随机在 1 到 $2n$ 的作业序列中生成三个分隔点将顺序序列分成四段,随机选择两段以决定变异位置信息并读取,然后去除最优宇宙中该顺序位置下的当前宇宙个体的拖轮信息,最后根据本文设计的启发式策略重新进行分配,即保持未变异位置的拖轮信息不变,变异位置的拖轮信息按照顺序的大小依次重新生成。从另一个角度来看,第一种变异方式类似于一种破坏算子与修复算子。

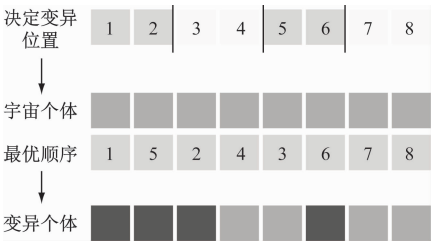


图 4 第一种变异方式

Fig. 4 The first mutation method

对于第二种变异操作采用部分变异策略,即在当前宇宙个体中的每一个变量元素依据一定概率为其重新随机分配满足功率需求的拖轮。该变异策略用以维持种群多样性同时兼顾局部开发功能,本文设定个体每一元素的变异概率为 20%。

4 算例分析

4.1 算例描述

文献[16]设计一定周期内的共计 16 艘到港船舶数据如表 3 所示。实验中对时间进行离散化处理,最小时间单位设为 0.25 h;参考南方某港的 3 个港区的布局将拖轮在港口各区域的行驶时间设定如表 4 所示,拖轮协助船舶靠泊前往各港区(离泊至锚地)的时间分别为 30 min、45 min、45 min;港口可调度的拖轮总数为 8 艘,具体参数见表 5 所示,其中本文针对拖轮的能耗进行离散化处理,每单位能耗分别对应 25 kW·h电耗或 5 kg 油耗,每单位电耗与油耗的成本分别为 25 元与 40 元,单位油耗的碳排放系数与碳排放成本分别设为 16 kg 与 3.2 元;混合动力拖轮的参数参考厦门港的运营参数进行设置;实验求解算法通过 MATLAB R2020b 实现,并在配置 3.20 GHz Intel Core i5-10505CPU 和 8G 内存的计算机上运行。

表 3 船舶数据

Tab. 3 Ship data

船舶	到港时间×0.25/h	作业时间×0.25/h	最迟离港时间×0.25/h	作业港区编号	所需拖轮功率×25/kW·h
1	2	30	40	2	1
2	4	25	36	1	3
3	4	12	36	3	2
4	14	22	60	1	1
5	16	15	60	2	3
6	20	32	70	3	2
7	28	15	62	3	2
8	36	24	76	2	2
9	44	22	71	2	3
10	46	12	90	1	2
11	64	14	102	3	2
12	68	28	110	1	1
13	72	15	112	2	3
14	74	15	112	3	3
15	76	12	115	1	2
16	80	12	115	2	2

表 4 拖轮航行时间

Tab. 4 Tugboat navigation time 单位:0.25 h

	港区 1	港区 2	港区 3	锚地
港区 1	0	2	2	1
港区 2	1	0	3	2
港区 3	2	3	0	2

表5 拖轮参数

Tab.5 Tugboat parameters

参数	拖轮型号			
	A	B	C	D
拖轮属性	混合动力	常规动力	常规动力	常规动力
拖轮等级	3	3	2	1
拖轮数量/艘	2	2	2	2
单位时间空驶能耗/25 kW·h或5 kg	8	8	7	6
电池容量及充电量×25/kW·h	60/5	—	—	—

4.2 算法有效性验证

将本文的线性模型导入Gurobi 10.0求解器中进行小规模的算例求解并与本文算法对比,将求解器的时间上限设定为3 h并运行在MATLAB语言环境下。算法参数设定种群规模为80,min与max分别为0.2与0.8,最大迭代次数为100。求解结果见表6所示,其中算例编号第1个数字代表到港船舶数量及第2个数字代表A型拖轮数量,其中A型与B型拖轮数量总和不变以确保拖轮总数相同,否则优先替换掉功率较大的拖轮。可以看出随着算例规模的增加求解器已无法在限定的时间内求解出最优方案,而本文算法已可求出更优的解。根据求解结果来看,误差范围从0%至1.62%不等。本文算法在小规模算例中可求出与Gurobi十分接近的解,并且误差水平在可接受的范围之内,因此有效验证了本文模型的有效性及求解算法的精确性。

表6 小规模算例实验结果

Tab.6 Experimental results of small-scale examples

算例编号	Gurobi		MVO		
	目标值/元	时间/s	目标值/元	时间/ s	差值/%
e4-0	20 849.6	47	21 012.2	325	0.78
e4-1	19 670.4	60	19 670.4	325	0
e4-2	18 598.4	61	18 755.4	326	0.84
e4-3	18 054.4	58	18 054.4	326	0.00
e4-4	17 499.2	46	17 499.2	326	0.00
e5-0	25 227.2	1 417	25 636.8	352	1.62
e5-1	24 003.2	1 446	24 220.8	353	0.91
e5-2	22 720.0	1 447	22 761.6	352	0.18
e5-3	21 814.4	2 392	21 932.8	350	0.54
e5-4	21 140.8	7 045	21 172.8	354	0.15
e6-0	31 416.0	10 032	31 416.0	378	0.00
e6-1	30 147.2	10 800	30 201.6	379	0.18
e6-2	28 627.2	10 800	28 681.6	380	0.19
e6-3	27 824.2	10 800	27 657.6	380	—

表7为本文算法与其余算法求解较大算例的求解结果(算例编号代表到港船舶数量),同时图5与图6分别为不同算法求解e16算例的收敛曲线对比和连续运行多次的目标值对比。其中:MVO1为去除第一种变异算子只保留第二种变异算子的多元宇宙优化算法;GA与IGA分别为采用精英保留策略的遗传算法与自适应遗传算法。各算法的种群规模均为80,遗传算法的交叉算子采用本文设定的交叉算子,变异算子为本文的第二种变异算子,所有算法的初始种群均利用启发式规则进行改进。分析可知,从求解出的最优目标值来看,本文算法在求解较大规模算例时均可得出优于其余算法求得的最优目标值,并且求解时间也在可接受的时间范围内;从算法的稳定性来看,本文算法的求解稳定性更好,在大规模算例求解中平均可求出优于GA与IGA算法4%与3.25%的目标值;与不带启发式策略的MVO1

相比,MVO 的求解效率明显更优,原因在于本文设计的启发式变异算子可引导种群向更优的方向进行变异进而有效提升算法搜索效率,因此得以验证本文算法在求解较大规模算例时的有效性。

表 7 大规模算例实验结果

Tab. 7 Experimental results of large-scale examples

算例编号	MVO		MVO1		IGA		GA	
	目标值/元	时间/s	目标值/元	时间/s	目标值/元	时间/s	目标值/元	时间/s
e10	47 606.4	488	47 817.6	485	47 817.6	467	48 222.0	463
e11	51 561.6	513	52 170.4	511	52 182.4	501	52 325.4	492
e12	54 921.6	545	56 084.8	545	55 829.2	531	56 016.0	521
e13	59 110.4	574	59 914.2	570	60 037.2	563	60 224.0	555
e14	63 004.4	602	64 794.4	602	64 768.0	594	65 139.2	587
e15	67 100.0	634	68 523.2	633	68 787.2	623	69 161.6	619
e16	72 517.6	667	75 259.0	663	74 933.6	660	75 588.8	652

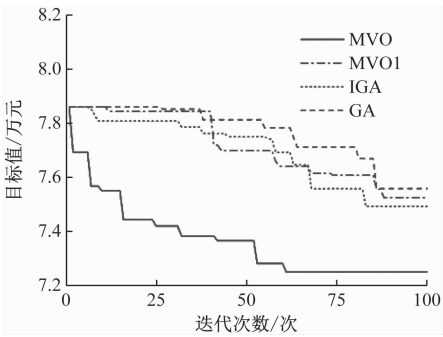


图 5 算法收敛对比

Fig. 5 Convergence comparison of algorithms

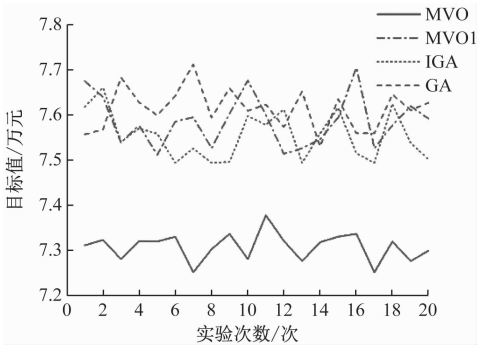


图 6 算法稳定性对比

Fig. 6 Stability comparison of algorithms

4.3 模型结果分析

对算例求解结果进行分析,将调度期内各类拖轮的作业次数、行驶次数等信息统计如表 8 所示。从拖轮的作业次数来看,A 型拖轮与 C 型拖轮在调度期内执行较多的任务次数并且跨港区行驶的次数也相对较多,B 型拖轮与 D 型拖轮执行较少的任务次数同时跨港区行驶时间较低;从拖轮的作业成本来看,A 型拖轮与功率较小的 D 型拖轮单次作业的平均成本较低,但 A 型拖轮在调度期内需要跨港区行驶的次数更多;从拖轮产生的碳排放成本来看,常规拖轮在调度期间均会产生较高的碳排放成本,而 A 型拖轮几乎不产生碳排放成本。综合来看,混合动力拖轮相比与常规动力拖轮在节能减排方面具有较高的潜力。

表 8 拖轮作业信息统计

Tab. 8 Tugboat operation data statistics

拖轮类型	作业总次数/次	港内行驶次数/次	拖轮作业成本/元	碳排放成本/元
A	24	14	11 460	12.8
B	11	1	6 720	537.6
C	22	10	15 960	1 276.8
D	7	1	2 880	230.4

4.4 拖轮配置对比讨论

本节将分析不同拖轮配置的特点。首先探讨异构与同构拖轮船队即纯常规动力拖轮船队在调度总成本方面的差异性,设定同构拖轮船队中的 B、C、D 型拖轮的数量分别为 4、2、2 艘,即与算例中异构拖轮配置在拖轮功率与数量上一致,并探讨在该配置上替换两艘常规拖轮为 A 型拖轮的配置方案如表 9 所示。

从配置 2 与配置 3 来看,配置 3 的船舶在港成本低于配置 2,但拖轮作业成本与碳排放成本高于配置 2。分析具体原因:配置 2 相比配置 3 将 B 型拖轮替换为了 D 型拖轮,虽然 D 型拖轮的作业成本较低,但其功率较小只能服务小型船舶,这一定程度

表9 不同拖轮配置方案1

Tab.9 Different tugboat configuration schemes 1

拖轮配置	A、B、C、D拖轮数量	总成本/元	船舶在港成本/元	拖轮作业成本/元	拖轮空驶总次数/次	碳排放成本/元	A、B、C、D拖轮作业次数
配置1	0、4、2、2	79 240.0	32 800	43 000	26	3 440.0	0、33、22、9
配置2	2、2、2、2	72 517.6	33 440	37 020	26	2 057.6	24、11、22、7
配置3	2、4、2、0	71 953.6	32 480	37 320	25	2 153.6	23、21、20、0
配置4	2、4、0、2	74 929.0	33 280	39 425	28	2 224.0	28、27、0、9

上会增加船舶的等待与拖轮行驶次数,并且D型拖轮的整体利用率也不高;配置3相比配置2将D型拖轮替换为了B型拖轮,虽然B型拖轮的作业成本较高,但其能服务的船舶类型较多,有利于减少船舶等待与拖轮行驶成本,同时该配置下的拖轮整体利用率相比配置2要高。综合来看,虽然两种配置的成本差异并不明显,但从拖轮的利用率及当前船舶大型化发展趋势来看,配置3要优于配置2;从配置4来看,由于D型拖轮的利用率不高,因此需要其余拖轮执行更多次任务,在一定程度上增加了调度期内的拖轮的行驶成本与助泊成本。

进一步探讨继续增加混合动力拖轮数量对于调度成本的影响,在上述拖轮配置3的基础上继续增加A型拖轮的数量,实验结果如表10所示。

表10 不同拖轮配置方案2

Tab.10 Different tugboat configuration schemes 2

拖轮配置	A、B、C、D拖轮数量	总成本/元	船舶在港成本/元	拖轮作业成本/元	拖轮空驶总次数/次	碳排放成本/元	A、B、C、D拖轮作业次数
配置5	4、4、0、0	67 715.2	32 000	34 640	25	1 075.2	42、22、0、0
配置6	4、2、2、0	67 089.6	32 800	33 320	25	969.6	44、8、12、0
配置7	6、2、0、0	63 358.4	32 320	30 680	25	358.4	53、11、0、0
配置8	6、0、2、0	61 971.2	31 680	29 804	25	451.2	53、0、11、0
配置9	8、0、0、0	59 960.0	31 360	28 600	25	0	64、0、0、0

配置5与配置6相比配置1分别可降低总成本约14.54%与15.33%。具体分析,配置5相比配置6将C型拖轮替换为B型拖轮,虽然功率大的拖轮产生的作业成本高但对于降低船舶的等待成本、减少拖轮跨港区航行成本具有一定的优势,功率小的拖轮则反之,因此两种拖轮配置总成本没有过于显著的差异。

配置7与配置8将A型拖轮增加至6艘,配置8的总成本更低。具体分析,从拖轮的作业次数来看,两种配置的常规动力拖轮与混合动力拖轮在调度期内的作业次数相同,但由于配置7中的常规拖轮为大功率拖轮因此作业成本相对更高,同时当大功率的拖轮数量增加至一定程度时对于减少船舶的等待时间及拖轮的行驶成本已难以产生显著作用;而虽然配置7中的常规拖轮功率相对较低,但配置中的大功率拖轮已足够调度使用需求,因此较小功率的拖轮可充分发挥出作业成本低的优势。

从混合动力拖轮对于降低总成本的角度来看,配置9的总成本最低,同时不产生任何碳排放成本,但从A型拖轮的数量不断增加的趋势来看,配置3、6、8与9相比配置1总成本分别降低9.20%、15.33%、21.79%与24.33%,即A型拖轮数量增加至一定数量时可大致认为总成本的降低幅度与A型拖轮数量呈线性相关,配置9相比配置8的总成本降低量仅增加了2.54%。具体分析主要体现在拖轮的利用率上,当A型拖轮数量增加至一定值时平均作业次数均较高而增加至一定值后平均作业次数便降低,对于降低总成本已产生不出显著作用;从降低碳排放的角度来看,增加混合动力拖轮的数量除了不断降低碳排放成本以外,同时碳排放成本所占作业总成本的比例也在不断下降,例如该比例在配置1的约8%不断降低至配置8的约1.51%,说明配置混合动力拖轮可以有效降低对环境成本的依赖。

综合来看,混合动力拖轮相比常规动力拖轮的初始投资成本更高、回收期也相对较长,因此港口需要合理考虑未来拖轮船队的配置,根据实际需求合理搭配常规拖轮及新能源拖轮的数量,以确保获得最大的运营效益。

5 结 语

本文研究了多港区情形下的异构拖轮调度问题并建立混合整数线性规划模型。分析表明:合理配置大功率与小功率拖轮的数量有利于降低船舶等待时间与拖轮作业总成本;配置一定数量的混合动力拖轮不仅可以有效降低运营成本,还可以同时降低拖轮碳排放成本占作业成本的比重,进而降低对环境成本的依赖。因此港口运营方需要根据实际需求合理配置新能源拖轮与常规拖轮的数量。

本文尚未充分考虑泊位、岸电等资源对拖轮调度的影响以及船舶到港及拖轮作业的不确定性。未来研究可进一步探讨新能源拖轮与其他港口资源的联合调度,同时建立更加高效的求解方法。

参 考 文 献

[1] 徐奇, 邵乾虔, 靳志宏. 基于混合流水作业组织的港口拖轮调度优化[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(2): 485-493.
Xu Q, Shao Q Q, Jin Z H. Optimization on tugboat operation scheduling based upon the hybrid flow shop arrangement [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(2): 485-493. (in Chinese)

[2] 刘志雄, 李俊, 邵正宇, 等. 拖轮动态调度的混合演化策略算法设计[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(2): 519-524.
Liu Z X, Li J, Shao Z Y, et al. Design of hybrid evolutionary strategy algorithm of dynamic tugboat scheduling problem [J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(2): 519-524. (in Chinese)

[3] 蔡芸, 刘朋青, 熊禾根. 基于量子遗传混合算法的泊位联合调度[J]. 计算机应用, 2020, 40(3): 897-901.
Cai Y, Liu P Q, Xiong H G. Berth joint scheduling based on quantum genetic hybrid algorithm [J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(3): 897-901. (in Chinese)

[4] Kang L, Meng Q, Tan K C. Tugboat scheduling under ship arrival and tugging process time uncertainty [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 144: 102125.

[5] 王巍, 赵宏, 李强. 面向多停泊基地的港口拖轮调度优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(13): 8-12.
Wang W, Zhao H, Li Q. Multi-objectives optimization for port tugboat scheduling considering multi-anchorage bases [J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(13): 8-12. (in Chinese)

[6] Zhen L, Wang K, Wang S, et al. Tug scheduling for hinterland barge transport: A branch-and-price approach [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 265(1): 119-132.

[7] Wei X, Jia S, Meng Q, et al. Tugboat scheduling for container ports [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 142: 102071.

[8] Li B, Chen Q, Lau Y, et al. Tugboat Scheduling with Multiple Berthing Bases under Uncertainty [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(11): 2180.

[9] Zhong H, Zhang Y, Gu Y. A Bi-objective green tugboat scheduling problem with the tidal port time windows [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 110: 103409.

[10] Wang Y, Zou T. Optimization of berth-tug co-scheduling in container terminals under dual-carbon contexts [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(4): 684.

[11] 施志洋. 探究港口纯电动拖轮碳减排效果[J]. 中国航海, 2025, 48(1): 190-198.
Shi Z Y. Exploring the carbon emission reduction effect of all-electric tugboats in ports [J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 190-198. (in Chinese)

[12] 卢翔, 张张, 李文豪. 纯电池动力系统在港作拖轮上的应用研究[J]. 船电技术, 2022, 42(8): 53-56.
Lu X, Zhang Z, Li W H. Study on the application of pure battery power system in craft tugs [J]. Marine electric & Electronic engineering, 2022, 42(8): 53-56. (in Chinese)

[13] 李梓, 赵旭, 朱泓, 等. 混合动力港作拖轮多工况模式的机桨匹配设计[J]. 船舶工程, 2023, 45(增刊1): 301-304.
Li Z, Zhao X, Zhu H, et al. Multi-mode engine-propeller matching design of hybrid tug [J]. Ship Engineering, 2023, 45(Suppl. 1): 301-304. (in Chinese)

[14] 张圣超. 串联式混合动力系统在拖轮上的应用[J]. 机电设备, 2023, 40(6): 14-19.
Zhang S C. Application of series hybrid power systemin tugboats [J]. Mechanical and electrical equipment, 2023, 40(6): 14-19. (in Chinese)

[15] Mirjalili S, Mirjalili S M, Hatamlou A. Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization [J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27(2): 495-513.

[16] 闵德权, 张志铎, 张伟航. 基于港口环境效益的岸电与泊位联合分配优化研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 83-90.
Min D Q, Zhang Z D, Zhang W H. Optimization of joint allocation of shore power and berth based on environmental benefit of port [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(1): 83-90. (in Chinese)