

文章编号:1000-4653(2025)01-0190-09

探究港口纯电动拖轮碳减排效果

施志洋

(上海海事大学 交通运输学院, 上海 201306)

摘要:纯电动拖轮碳排放少,但其电池充电问题会导致船舶延误,从而增加港区整体碳排放成本。因此,有必要针对港口纯电动拖轮的碳减排表现进行研究,探究纯电动拖轮相较于柴油拖轮在港口作业中的碳减排效果。文章以拖轮碳排放和船舶延误碳排放之和最低为目标函数,分别建立纯电动拖轮和柴油拖轮的调度优化模型,以宁波舟山港三个港区某天数据为实例,利用 Gurobi 求解器寻求最优解,并将相同马力和数量的纯电动与柴油拖轮处理相同船舶时最低拖轮碳排放成本和碳排放总成本对比研究。结果表明,若仅考虑拖轮碳排放成本,纯电动拖轮相较柴油拖轮可降低碳排放成本 9.5% ~ 22.9%;若考虑港区整体碳排放成本,纯电动拖轮在处理 8 艘以下船舶时仍具有良好的碳减排效果,但在船舶数量超过 8 艘、港口繁忙时,纯电动拖轮充电问题反而会增加港口整体碳排放成本(24.68%),不利于港口减排。

关键词:纯电动拖轮;拖轮调度;优化建模;碳排放;Gurobi

中图分类号:U692.4

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.024

Exploring the carbon emission reduction effect of all-electric tugboats in ports

SHI Zhiyang

(College of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: All-electric tugboats (AETs) produce fewer carbon emissions, but their battery charging requirements can lead to ship delays, which may increase the overall carbon emission costs in ports. Therefore, it is essential to study the carbon emission reduction performance of AETs in ports and compare their effectiveness with that of diesel tugboats (DTs). This paper establishes scheduling optimization models for AETs and DTs, respectively, using the sum of tugboat carbon emissions and ship delay carbon emissions as the objective function. Taking a day's data from three port areas in Ningbo-Zhoushan Port as an example, the Gurobi solver is employed to find the optimal solution. A comparative study is conducted on the minimum tugboat carbon emission cost and total carbon emission cost when AETs and DTs with the same horsepower and quantity are used to handle the same ships. The results show that if only the carbon emission cost of tugboats is considered, AETs can reduce carbon emission costs by 9.5% to 22.9% compared to DTs. However, when considering the overall carbon emission cost of the port areas, AETs still demonstrate good carbon emission reduction effects when handling fewer than 8 ships. When the number of ships exceeds 8 and the port is busy, the charging requirements of AETs increase the overall carbon emission cost of the port by 24.68%, which is not conducive to port carbon emission reduction.

Key words: all-electric tugboat; tugboat dispatch; optimized modeling; carbon emission; Gurobi

根据国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)的相关研究,2007~2012年全球航运业的CO₂排放量约占全球CO₂排放总量的2.7%,到2050年将增加50%~250%^[1],若不采取

措施,航运业CO₂排放量占全球CO₂排放总量可能会增加到17%。因此,为节能减排,新能源船舶概念应运而生。

纯电池动力是船用新能源的一个重要研究方

收稿日期:2023-12-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0115100)

作者简介:施志洋(1999—),男,硕士研究生,研究方向为港口碳减排。E-mail:szy1999128@163.com

引用格式: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)

向,具有放电范围宽广、占地小、续航弱等特征。而港作拖轮具有高机动、大功率输出、操作灵活等特点,其作业时间间断且作业范围相对集中在港口,是港口重要的排放源^[2]。港作拖轮因其特殊的航行区域(港区)和作业模式(作业时间短且间断),与纯电动拖轮的适用场景高度吻合。目前,绿色低碳的港口岸电配套设备的使用,可大大降低纯电动拖轮的使用成本。因此,纯电动拖轮较其他能源形式拖轮有较大的优势。目前,我国连云港集团已于2019年正式启动国内首艘纯电动拖轮“云港电拖一号”的研发建造工作,并在2021年8月顺利交付并试运行。“云港电拖二号”研发项目也在2022年正式启动并于2023年全面开展建造工作。但由于电池技术限制,续航问题始终是影响纯电动拖轮进一步发展和港口扩大投入规模的重要因素。

目前,国内外电动拖轮理论研究方面,大部分文献集中在研究油电混合拖轮,例如:叶进京^[3]、张圣超等^[4]针对厦门港实际需求,多方面对比考虑混合动力系统的不同供电推进方式,结果表明:油电混合拖轮目前最适合厦门港的实际需求。孟嗣斐等^[5]建立油电混合动力系统试验台并进行研究,发现油电混合动力系统可以稳定运行。KUMAR等^[6]提出了一种优化油电混合拖轮柴油发电机和蓄电池的方法,仿真试验结果表明优化后的推进系统可节油29.86%。BIRUDULA等^[7]提出了一种油电混合动力系统的燃油经济性协调控制策略,试验结果表明该策略可节约燃油消耗26.42%。CHUA等^[8]提出一种基于瞬时优化的油电混合动力系统方法并采用等效消耗最小化策略(Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS),可在一个周期的港口拖轮操作中节省高达24.4%的燃料。

上述文献皆关于油电混合拖轮,而涉及纯电动拖轮的研究,仅有个别文献:卢翔等^[2]收集大量数据分析拖轮能耗特性,并与纯电池动力系统主要特性对比,论证了纯电池动力系统在港作拖轮应用的可行性。THANH等^[9]提出纯电动拖轮电源管理的优化方案,优化分配发动机和电池的供电,从而最大限度地降低发动机油耗并保持电池寿命。KOZNOWSKI等^[10]则研究了船体形状对纯电动拖轮能耗的影响,并提出应用粒子群优化方法改变船体形状,降低电动拖船能耗。GAO等^[11]基于拖轮在航行过程中的各种操作条件,提出一种兼顾经济性和运行可靠性的能源系统优化方案,并通过仿真验证方案有效性。

除此之外,在拖轮调度优化领域,涉及拖轮调度

减排的文献也较少。如ZHU等^[12]提出一种以最小化驳船装卸、拖轮行驶和等待过程的碳排放之和为目标的规划模型,联合优化拖轮运输路线。结果表明,该模型减少了约46.93%的碳排放。ZHONG等^[13]构建以最大完工时间和总燃油消耗最小化为目标并考虑潮汐时间窗的双目标拖轮调度优化模型。结果表明,该模型可降低拖轮公司的运营成本,并减少拖轮的燃油消耗及其碳排放。

综上,现有文献大多研究油电混合拖轮或纯电动拖轮的能源动力系统,少部分涉及柴油拖轮调度减排模型,而尚未有学者提出关于纯电动拖轮的调度优化模型并对其碳减排效果进行定量研究。因此,本文以拖轮碳排放成本和船舶延误碳排放成本之和最小为目标,分别建立柴油拖轮和纯电动拖轮的调度优化模型,对比研究相同马力和数量的柴油和纯电动拖轮在面对相同船舶拖曳任务时的最佳表现,以此探究纯电动拖轮在港区作业时的碳减排效果,从而填补上述研究空白,为新能源拖轮研究领域提供新思路,也为在实际生产中使用纯电动拖轮的港口提供依据,具有重要理论研究和现实意义。

1 拖轮调度优化问题

1.1 问题描述

宁波舟山港作为世界一流强港,是中国超大型巨轮进出最多的港口之一,由北仑、大榭、穿山等19个港区组成。北仑、穿山和大榭分别为宁波舟山港三片相临近港区,如图1所示。大榭港区位于北仑和穿山港区之间,北仑和穿山港区的拖轮除了完成本港区作业外,常需行驶至大榭港区协助部分船舶靠离泊作业,甚至在港口繁忙期间,北仑与穿山港区的拖轮也会出现跨港区调度情况,加剧拖轮能耗压力。



图1 三港区示意

Fig. 1 Diagram of the three port areas

模型初始期时,所有拖轮在基地待定,船舶到达锚地后按计划时刻表依次靠泊,根据拖轮配备标准

为船舶分配相应数量和马力的拖轮。船舶 i 若是拖轮 m 第 1 个任务,则需等待拖轮 m 从拖轮基地行驶至船舶 i 的拖曳地点;若非第 1 个任务(表示拖轮 m 并非从拖轮基地出发),且拖轮 m 空闲,则可提前行驶至船舶 i 拖曳地点等待为其服务。但若港区内等待拖曳船舶众多,拖轮应接不暇或因充电难以及时提供服务,需跨港区或从拖轮基地中调度拖轮,此时则可能产生船舶延误。此外,纯电动情况下,拖轮 m 完成船舶 i 拖曳任务后就近靠泊,判断剩余电量是否小于最低剩余电量,若小于则需充电,且在充电期间无法执行拖曳任务,若无需充电,则靠泊等待分配下一个拖曳任务,等待期间的耗电量忽略不计。柴油拖轮则无需考虑充电情况。

1.2 纯电动拖轮调度模型假设

1.2.1 模型假设

- 1) 港口港池内有足够的空闲空间(港内锚地)供船舶临时停靠。
- 2) 船舶完成靠泊后立刻开始装卸作业。
- 3) 拖轮在等待期间的耗电量忽略不计。因为其在等待期间处于待命状态,通常耗电很少或不消耗电量。
- 4) 船舶预计靠离泊时刻、靠泊泊位、船长、载货量、吨位、吃水深度等信息是已知的。
- 5) 所有拖轮在空驶时的行驶速度相同。
- 6) 在初始状态,所有拖轮均位于停泊基地并可用,所有船舶需到达外锚地等待进港。
- 7) 忽略大风、海流、冰冻等其他随机干扰因素。
- 8) 航道为双向航道,因此船舶进出港不受反向船舶影响。

1.2.2 符号及定义

本文中所使用的符号及定义见表 1、表 2 和表 3。

表 1 集合

Tab.1 Set

| 集合 | 含义 |
|-----|----------|
| M | 所有拖轮集合 |
| V | 所有来港船舶集合 |
| G | 所有拖轮任务集合 |

1.2.3 目标函数

- 1) 纯电动拖轮总碳排放成本 $C_{ele, total}$:

$$\min C_{ele, total} = C_1 + C_2 \quad (1)$$

当拖轮为纯电动拖轮时,总碳排放成本 $C_{ele, total}$ 包括纯电动拖轮的碳排放成本 C_1 和船舶等待延误的碳排放成本 C_2 , 表示为:

表 2 参数

Tab.2 Parameter

| 参数 | 含义 |
|---------------|--------------------------------------|
| i | 船舶编号, $i \in V$ |
| m | 拖轮编号, $m \in M$ |
| g | 任务编号, $g \in G$ |
| μ_i | 船舶 i 所需拖轮数量 |
| H_i | 船舶 i 所需马力总数 |
| h_m | 拖轮 m 的额定功率 |
| T_i | 船舶 i 的拖曳时长 |
| β_i | 表示船舶 i 在泊位上的装卸时间 |
| $t_{p,i}$ | 船舶 i 预计开始拖曳时刻 |
| $E_{t,i}$ | 船舶 i 等待每小时排放量 |
| $E_{c,m}$ | 拖轮 m 在拖曳任务时每小时所耗电量 |
| $E_{s,m}$ | 拖轮 m 在空驶时每小时所耗电量 |
| φ | 碳税价格 |
| ω | 每度电排放因子 |
| c | 每度电充电所需时间 |
| F | 柴油排放因子 |
| Ω | 电量排放因子 |
| S_{max} | 电池剩余电量最大百分比 |
| S_{min} | 电池剩余电量最小百分比 |
| $E_{rated,m}$ | 纯电动拖轮 m 电池额定电量 |
| Q | 一个足够大的正数 |
| $T_{D,ii'}$ | 拖轮从船舶 i 拖曳地点行驶至船舶 i' 拖曳地点的航行时间 |
| $T_{B,mi}$ | 拖轮 m 从其所属拖轮基地出发行驶至船舶 i 拖曳地点的航行时间 |

$$C_1 = \sum_{m=1}^T \sum_{g=1}^G (S_{start,mg} - S_{final,mg}) \times E_{rated,m} \times \omega \times \varphi \quad (2)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^V E_{t,i} \times (t_{Astart,i} - t_{p,i}) \times \varphi \quad (3)$$

- 2) 柴油拖轮总碳排放成本 $C_{oil, total}$:

$$\min C_{oil, total} = C'_1 + C_2 \quad (4)$$

当拖轮为柴油拖轮时,总碳排放成本 $C_{oil, total}$ 包括柴油拖轮的碳排放成本 C'_1 (见式(5)) 和船舶等待延误的碳排放成本(见式(3))。

$$C'_1 = \sum_{m=1}^T \sum_{g=1}^G \left(E_{s,m} \times T_{N,mg} + E_{c,m} \times \sum_{i=1}^V X_{img} \times T_i \right) \times F \times \varphi \quad (5)$$

表3 决策变量
Tab.3 Decision variable

| 决策变量 | 含义 |
|-----------------|---|
| X_{img} | 如果船舶 i 由拖轮 m 第 g 个服务 ($g \in G$), 则为 1, 否则为 0 |
| U_{mg} | 如果拖轮 m 完成第 g 个任务后的剩余电量小于最小剩余电量, 则就近靠泊充电, 为 1, 否则为 0 |
| $t_{Astart,i}$ | 船舶 i 作业实际开始的时刻 |
| $t_{Afinal,i}$ | 船舶 i 作业实际结束的时刻 |
| $t_{Mstart,mg}$ | 拖轮 m 第 g 个任务的实际开始时刻 |
| $t_{Mfinal,mg}$ | 拖轮 m 第 g 个任务的实际结束时刻 |
| $S_{start,mg}$ | 拖轮 m 开始第 g 个任务前电池的剩余电量 |
| $S_{final,mg}$ | 拖轮 m 完成第 g 个任务后电池的剩余电量 |
| $T_{N,mg}$ | 拖轮 m 从完成第 g 个任务后所处地点行驶至下一个任务拖曳地点所需行驶时间 |
| C_{mg} | 纯电动拖轮 m 完成第 g 个任务后若需要充电, 所需的充电时间 |

1.2.4 约束条件

1) 纯电动拖轮约束条件

$$\sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G X_{img} = \mu_i \quad \forall i \in V \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G X_{img} h_m \geq H_i \quad \forall i \in V \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^V X_{img} - \sum_{i'=1}^V X_{i'm(g+1)} \geq 0 \quad \forall m \in M, \forall g \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{i'-1} X_{img} \geq X_{i'm(g+1)} \quad \forall i' \in V, i < i', \forall m \in M, \forall g \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (9)$$

式(6)~(9)为拖轮分配约束。其中,式(6)~(7)分别表示船舶 i 所需拖轮数量和所需拖轮马力;式(8)表示每艘船舶所处理的任务按顺序排列;式(9)表示拖轮根据所计划的拖曳顺序优先给予船舶。

$$\sum_{i=1}^V X_{img} \leq 1 \quad \forall m \in M, g \in G \quad (10)$$

$$\sum_{g=1}^G X_{img} \leq 1 \quad \forall i \in V, m \in M \quad (11)$$

式(10)表示每艘拖轮同一时刻最多只能服务一艘船舶;式(11)表示每艘船舶同一时刻只能被拖轮服务一次。

$$T_{N,mg} = \sum_{i=1}^V \sum_{i'=1}^V X_{img} \times X_{i'm(g+1)} \times T_{D,ii'} \quad \forall i, i' \in V, m \in M, g \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (12)$$

$$T_{N,m0} = \sum_{i=1}^V X_{im1} \times T_{B,mi} \quad \forall m \in M \quad (13)$$

式(12)和(13)为拖轮行驶时间约束。其中,式(12)表示拖轮 m 从完成第 g 个任务后所处地点行驶至下一个任务拖曳地点所需行驶时间;式(13)表示拖轮 m 从拖轮基地出发行驶至第一个任务拖曳地点的行驶时间。

$$t_{Mstart,m1} \geq T_{N,m0} + \sum_{i=1}^V X_{im1} \times t_{p,i} \quad \forall m \in M \quad (14)$$

$$t_{Mfinal,mg} = t_{Mstart,mg} + \sum_{i=1}^V X_{img} \times T_i \quad \forall m \in M, g \in G \quad (15)$$

$$t_{Mstart,m(g+1)} \geq t_{Mfinal,mg} + C_{mg} + T_{N,mg} \quad \forall m \in M, g = \{1, 2, 3, \dots, n-1\} \quad (16)$$

式(14)~(16)为拖轮各项任务的开始和结束时刻。其中,式(14)表示拖轮 m 能够开始第 1 个任务的时刻,由于拖轮初始状态都处于其所属拖轮基地,因此只需要计算拖轮 m 服务的第 1 艘船 i 拖曳任务的预计开始时刻加上从拖轮基地行驶至拖轮 m 第 1 个任务开始地点的航行时间即可;式(15)表示拖轮 m 第 g 个任务的实际开始时刻和实际结束时刻之间的关系;式(16)表示拖轮 m 能够开始第 $(g+1)$ 个任务的时刻,等于拖轮 m 第 g 个任务的结束时刻加上拖轮 m 完成第 g 个任务后行驶至下一个任务开始地点的航行时间加上若拖轮 m 完成第 g 个任务后剩余电量小于最低剩余电量随之产生的充电时间。

$$t_{Afinal,i} = t_{Astart,i} + T_i \quad \forall i \in V \quad (17)$$

$$t_{Astart,i} \geq t_{p,i} \quad \forall i \in V \quad (18)$$

式(17)表示船舶 i 拖曳任务的实际开始时刻和实际结束时刻之间的关系;式(18)约束了船舶 i 拖曳作业的实际开始时刻,需大于等于船舶 i 拖曳作业的预计开始时刻。

$$t_{Mstart,mg} \leq t_{Astart,i} + Q \times (1 - X_{img}) \quad \forall i \in V, m \in M, g \in G \quad (19)$$

$$t_{Mstart,mg} + Q \times (1 - X_{img}) \geq t_{Astart,i} \quad \forall i \in V, m \in M, g \in G \quad (20)$$

式(19)和式(20)保证分配到同一艘船的拖轮同时开始服务。

$$U_{mg} = \begin{cases} 1 & S_{final,mg} \leq S_{min} \\ 0 & S_{final,mg} > S_{min} \end{cases} \quad (21)$$

$$S_{\text{final},mg} \geq 0 \quad \forall m \in M, g \in G \quad (22)$$

$$S_{\text{final},mg} = S_{\text{start},mg} - \left[E_{s,m} \times T_{N,m(g-1)} + E_{c,m} \times \sum_{i=1}^V X_{img} \times T_i \right] / E_{\text{rated},m} \quad \forall m \in M, g \in G \quad (23)$$

$$S_{\text{start},mg} = S_{\text{final},m(g-1)} \times (1 - U_{m(g-1)}) + S_{\text{max}} \times U_{m(g-1)} \quad \forall m \in M, g \in G \quad (24)$$

$$C_{mg} = c \times (S_{\text{max}} - S_{\text{final},mg}) \times E_{\text{rated},m} \times U_{mg} \quad (25)$$

式(21)~(25)为纯电动拖轮充电约束。其中,式(21)规定了纯电动拖轮的充电判定规则,若拖轮 m 完成第 g 个任务后的剩余电量小于等于电池最低电量,则拖轮就近靠泊充电,反之,则无需充电;式(22)表示拖轮 m 完成第 g 个任务后的剩余电量必须是非负;式(23)表示拖轮 m 完成第 g 个任务后的剩余电量情况,等于第 g 个任务开始前的剩余电量——拖轮 m 从第 $g-1$ 个任务完成位置行驶至下一个任务船舶拖曳位置的航行电量——第 g 个拖曳任务所需电量;式(24)表示拖轮 m 第 g 个任务开始前剩余电量的两种情况,若拖轮 m 完成第 $g-1$ 个任务后无需充电,则拖轮 m 第 g 个任务开始前的剩余电量为第 $g-1$ 个任务结束后的剩余电量;若拖轮 m 完成第 $g-1$ 个任务后需要充电,则拖轮 m 第 g 个任务开始前的剩余电量应为满电状态;式(25)规定纯电动拖轮若需充电的充电时间计算规则。

2) 柴油拖轮约束条件

柴油拖轮调度模型的约束条件仅需要考虑式(6)~(20)。

2 求解方法及数据收集

2.1 求解方法概述

Gurobi 是新一代大规模数学规划优化器,由美国 Gurobi 公司开发,可以求解线性规划、整数规划和某些非线性规划问题,在很多行业都有着广泛的应用^[14]。在第三方评比中,Gurobi 求解速度是 Xpress 的 4 倍,是 Cplex 的 14 倍,能够快速而精确地得到最优结果^[15]。

本文利用 Gurobi 求解器,在 Python 语言环境下对上述优化模型进行求解,求解过程中所涉及的变量如第 1.2.2 节符号及定义中表 3 决策变量所示。

2.2 拖轮数据概述

本文以宁波舟山港穿山港区、大榭港区和北仑港区(分别用 1P,2P,3P 代指)2023 年 2 月 21 日~22 日期间的拖轮运行情况和船舶拖曳情况为案例,

在案例选取日当天,三大港区中共有 10 艘拖轮执行作业,拖轮所属港区、具体马力类型和数量如表 4 所示。根据文献[14]所提出的不同工况下拖轮功率计算公式,拖轮在拖曳和空驶时的平均每小时耗电量也如表 4 所示。拖轮航行时间选用同港区和不同港区之间的平均航行时间,根据船讯网拖轮轨迹数据计算得来,如表 5 所示。对于不同类型的船舶,根据表 6 所示的拖轮配备标准,安排不同数量和马力类型的拖船协助靠泊和离泊。其他参数例如:纯电动拖轮的额定电量以连云港“云港电拖一号”为标准,设为 5 000 kWh;每度电排放因子 ω 参考《企业温室气体排放核算方法与报告指南发电设施》,而柴油排放因子 F 参考文献[16],碳税价格 φ 参考文献[17]。由于纯电动拖轮每度电的充电时间数据难以获得,因此由“云港电拖一号”的预计充满电时间估算得来。最大和最小剩余电量百分比参照锂电池最优剩余电量百分比,设置为 90% 和 30%。如表 7 所示。

表 4 拖轮信息

Tab. 4 Ship information

| m | 港区 | h_m/kW | $E_{c,m}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ | $E_{s,m}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ |
|-----|----|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1P | 4 397 | 2 772 | 2 002.73 |
| 2 | 2P | 4 397 | 2 772 | 2 002.73 |
| 3 | 3P | 4 097 | 2 583 | 1 823.77 |
| 4 | 1P | 3 798 | 2 394 | 1 690.32 |
| 5 | 2P | 3 798 | 2 394 | 1 690.32 |
| 6 | 1P | 3 438 | 2 167 | 1 495.67 |
| 7 | 3P | 3 438 | 2 167 | 1 495.67 |
| 8 | 3P | 2 898 | 1 827 | 1 232.66 |
| 9 | 2P | 2 898 | 1 827 | 1 232.66 |
| 10 | 1P | 2 898 | 1 827 | 1 232.66 |

表 5 拖轮同港区和不同港区间平均航行时间

Tab. 5 Average tugboat sailing time between the same port area and different port areas 单位:h

| 港区 | 航行时间 |
|-------|------|
| 1P | 0.47 |
| 2P | 0.50 |
| 3P | 0.55 |
| 1P~2P | 0.72 |
| 1P~3P | 1.50 |
| 2P~3P | 0.85 |

表6 拖轮配备标准

Tab.6 Tug boat allocation criteria

| 船长/m | μ_i /艘 | H_i /kW |
|--------------------|------------|--------------------|
| $80 \leq L < 120$ | 1 | — |
| $120 \leq L < 180$ | 2 | 一艘拖轮功率不低于 2 205 |
| $180 \leq L < 230$ | 2 | 每艘拖轮功率不低于 2 205 |
| $230 \leq L < 270$ | 2 | 每艘拖轮功率不低于 2 940 |
| $270 \leq L < 350$ | 3 | 两艘拖轮的每艘功率不低于 2 940 |
| $L \geq 350$ | 4 | 三艘拖轮的每艘功率不低于 2 940 |

表7 其他参数

Tab.7 Other parameters

| 参数 | 数值 |
|------------------------------|------------------------|
| Ω/t | 5.839×10^{-4} |
| F/t | 6.83×10^{-4} |
| $\varphi/\text{元}$ | 18 |
| C/h | 4×10^{-4} |
| $S_{\max}/\text{kW} \cdot h$ | 90% |
| $S_{\min}/\text{kW} \cdot h$ | 30% |

2.3 船舶数据概述

本文选取宁波舟山港穿山港区、大榭港区和北仑港区 2023 年 2 月 21 日~22 日部分靠泊船舶时刻表为例。详细的船舶信息如表 8 所示,其中船舶预计开始拖曳时刻选自船讯网,其拖曳任务所需时间 T_i 选取服从 15~30 分钟均匀分布的随机数,船舶装卸时间选取中国港口平均在泊时间 1.07 天,即 25.68 小时。等待时每小时碳排放量计算公式参考文献[18]。

3 结果分析

经 Gurobi 求解模型获取最优解后,首先对 10 艘柴油拖轮处理数量依次增加的拖曳船舶进行求解。随后,将 10 艘拖轮全部假设为纯电动(所属港区和马力不变),再对 10 艘纯电动拖轮处理相同情况的拖曳船舶进行优化求解。最后,将柴油拖轮和纯电动拖轮计算结果进行比较,如表 9、图 2 和表 10、图 3 所示。表 9 和图 2 为拖轮碳排放成本结果对比,表 10 和图 3 为港区总碳排放成本结果对比。

由图 2 和表 9 可知,纯电动拖轮的碳排放成本始终小于柴油拖轮,可减少碳排放成本约 9.5%~22.9%。然而,若加入船舶延误碳排放成本,考虑港区整体碳排放成本,结果如图 3 和表 10 所示。无论

表8 船舶信息

Tab.8 Ship information

| i | 港区 | $t_{p,i}$ | T_i/h | β_i/h | $E_{r,i}/t$ |
|-----|----|------------|---------|-------------|-------------|
| 1 | 1P | 2/21 14:38 | 0.48 | 25.68 | 1.88 |
| 2 | 2P | 2/21 15:15 | 0.32 | 25.68 | 1.27 |
| 3 | 3P | 2/21 17:00 | 0.27 | 25.68 | 1.88 |
| 4 | 2P | 2/21 18:20 | 0.48 | 25.68 | 1.53 |
| 5 | 1P | 2/21 19:00 | 0.37 | 25.68 | 1.27 |
| 6 | 1P | 2/21 20:10 | 0.32 | 25.68 | 1.87 |
| 7 | 1P | 2/21 22:10 | 0.25 | 25.68 | 1.82 |
| 8 | 3P | 2/21 22:20 | 0.37 | 25.68 | 1.75 |
| 9 | 2P | 2/22 1:40 | 0.38 | 25.68 | 1.54 |
| 10 | 1P | 2/22 2:00 | 0.40 | 25.68 | 1.75 |
| 11 | 1P | 2/22 6:00 | 0.34 | 25.68 | 1.86 |
| 12 | 3P | 2/22 8:02 | 0.42 | 25.68 | 1.88 |

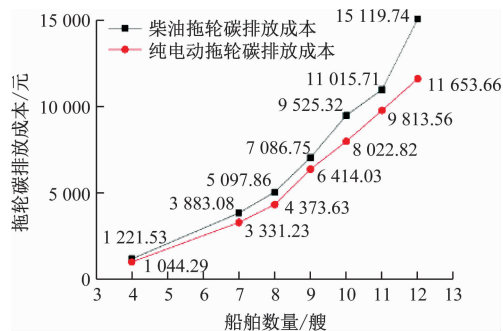


图2 拖轮碳排放成本对比

Fig.2 Comparison of tugboat carbon emission cost

表9 拖轮碳排放成本结果

Tab.9 Tugboat carbon cost results

| i | 柴油 $C_1/\text{元}$ | 纯电动 $C_1/\text{元}$ | 减少百分比/% |
|-----|-------------------|--------------------|---------|
| 4 | 1 221.53 | 1 044.29 | 14.5 |
| 7 | 3 883.08 | 3 331.23 | 14.2 |
| 8 | 5 097.86 | 4 373.63 | 14.2 |
| 9 | 7 086.75 | 6 414.03 | 9.5 |
| 10 | 9 525.32 | 8 022.82 | 15.8 |
| 11 | 11 015.71 | 9 813.56 | 10.9 |
| 12 | 15 119.74 | 11 653.66 | 22.9 |

是纯电动拖轮还是柴油拖轮,总碳排放成本都随着拖曳船舶数量的增加而增加。在拖轮处理 4 艘、7 艘、8 艘以及 10~12 艘船舶时,总成本的增长趋势大致相似,然而在处理 9 艘船舶时,纯电动拖轮的总成本相较于 8 艘船舶增长显著,而柴油拖轮在处理 9 艘船舶时的总成本却没有显著增长。此外,由图 3

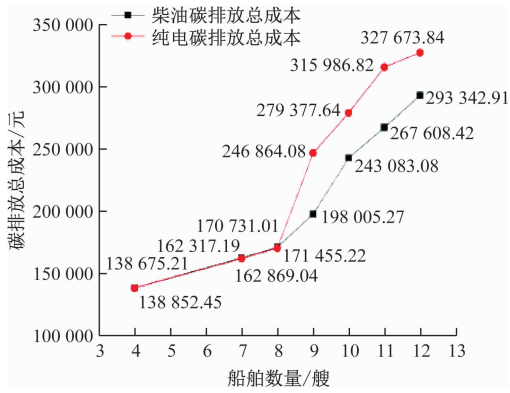


图3 总碳排放成本对比

Fig. 3 Comparison of total carbon cost

表10 碳排放总成本结果

Tab. 10 Total cost of carbon results

| i | 柴油 C_{total}^{oil} /元 | 纯电动 C_{total}^{ele} /元 | 减少百分比/% |
|-----|-------------------------|--------------------------|---------|
| 4 | 138 852.45 | 138 675.21 | 0.13 |
| 7 | 162 869.04 | 162 317.19 | 0.34 |
| 8 | 171 455.22 | 170 731.01 | 0.42 |
| 9 | 198 005.27 | 246 864.08 | -24.68 |
| 10 | 243 083.08 | 279 377.64 | -14.93 |
| 11 | 267 608.42 | 315 986.82 | -18.08 |
| 12 | 293 342.91 | 327 673.84 | -11.70 |

对比可知,在处理8艘及以下数量的船舶时,纯电动拖轮碳排放总成本均略低于柴油拖轮。然而,从9艘船舶开始,纯电动拖轮的碳排放总成本开始突增并超过柴油拖轮。针对此特殊情况,对两种类型拖

表11 每艘船舶实际开始服务时刻与其预计开始服务时刻的对比(9艘船舶)

Tab. 11 Comparison of the actual moment of commencement of service for each ships with its expected moment of commencement of service (9 vessels)

| 船舶 | 预计开始拖曳时刻 | 柴油拖轮实际开始拖曳时刻 | 柴油拖轮延误时间 | 纯电动拖轮实际开始拖曳时刻 | 纯电动拖轮延误时间 |
|----|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------|
| 1 | 2023/2/21 14:38 | 2023/2/21 15:07 | 0:28:13 | 2023/2/21 15:07 | 0:28:13 |
| 2 | 2023/2/21 15:15 | 2023/2/21 15:45 | 0:30:00 | 2023/2/21 15:45 | 0:30:00 |
| 3 | 2023/2/21 17:00 | 2023/2/21 17:00 | 0:00:00 | 2023/2/21 17:00 | 0:00:00 |
| 4 | 2023/2/21 18:20 | 2023/2/21 18:20 | 0:00:00 | 2023/2/21 18:50 | 0:30:00 |
| 5 | 2023/2/21 19:00 | 2023/2/21 19:00 | 0:00:00 | 2023/2/21 19:00 | 0:00:00 |
| 6 | 2023/2/21 22:10 | 2023/2/21 22:10 | 0:00:00 | 2023/2/21 22:10 | 0:00:00 |
| 7 | 2023/2/21 22:20 | 2023/2/21 22:20 | 0:00:00 | 2023/2/21 22:20 | 0:00:00 |
| 8 | 2023/2/22 1:40 | 2023/2/22 1:40 | 0:00:00 | 2023/2/22 1:40 | 0:00:00 |
| 9 | 2023/2/22 2:00 | 2023/2/22 2:00 | 0:00:00 | 2023/2/22 2:00 | 0:00:00 |

轮处理9艘船舶时的优化结果进行进一步分析。

表11为柴油拖轮和纯电动拖轮分别处理9艘船舶时,每艘船舶实际开始服务时刻与其预计开始服务时刻的对比。由表11可知,在处理第1、第2艘船时,柴油拖轮和纯电动拖轮均产生了28分13秒和30分钟的延误时间,其延误原因主要是本模型设定了拖轮在计划期开始前均在拖轮基地待命,因此这两艘船舶需要等待分配给其的拖轮从拖轮基地行驶至拖曳作业点的时间。后续船舶则可由已离开拖轮基地的空闲拖轮服务,若分配给船舶的拖轮均空闲,则可提前行驶至船舶拖曳点,无需等待时间。然而,在处理第4艘船舶时,纯电动拖轮产生了30分钟的延误,而柴油拖轮则没有产生延误。此外,表12为纯电动拖轮和柴油拖轮处理9艘船舶时的具体碳排放成本,可知尽管纯电动拖轮较柴油拖轮减少碳排放9.49%,但其船舶延误碳排放成本较柴油拖轮增加了25.94%。由此推定,处理9艘船舶时总成本突增主要是由纯电动拖轮处理船舶延误时间的增加所导致。

然而,在柴油拖轮和纯电动拖轮的马力、数量和所属港区均相同、处理船舶也相同的情况下,两种拖轮调度模型仅存在纯电动拖轮充电约束的差别,即式(21)~(25)。由此可见,纯电动拖轮的船舶额外延误时间是因其续航充电特性所导致(此案中第4艘船所属大榭港区中,电量充足的纯电动拖轮数量不足,需从北仑港区借调拖轮,第4艘船需等待拖轮从北仑港区行驶至大榭港区,因而产生延误)。

表 12 两种类型拖轮处理 9 艘船舶时的碳排放成本

Tab. 12 Cost of carbon emissions for two types of tugs handling nine ships

| | C_1 | C_2 |
|-------|-----------|-------------|
| 纯电动拖轮 | 6 414. 03 | 240 450. 05 |
| 柴油拖轮 | 7 086. 75 | 190 918. 51 |
| 变动量 | -9. 49% | 25. 94% |

综上,尽管纯电动拖轮自身碳排放低于柴油拖轮,但若考虑港区整体排放,因纯电动拖轮需要充电续航的特性会导致船舶等待延误,反而增加港口整体排放。

4 结束语

为探究纯电动拖轮在港口作业中的碳减排效果,本文以拖轮碳排放成本和船舶延误碳排放成本之和最小为目标,分别建立柴油和纯电两种类型拖轮的调度模型,并选用宁波舟山港三港区实例数据验证模型可行性。结果表明:仅考虑拖轮自身碳排放时,纯电动拖轮较柴油拖轮具有良好的碳减排效果,可有效减少 9.5% ~ 22.9% 的碳排放。当考虑港区整体排放时,船舶数量在 8 艘以下纯电动拖轮足以满足船舶拖曳需求,仍能保持碳减排效果。但当船舶数量在 8 艘以上、港口繁忙情况下,纯电动拖轮存在续航问题,反而增加港口整体碳排放 24.68%,不利于整体减排。

本文提出了纯电动拖轮的调度优化模型,考虑了拖轮跨港区调度和日常靠离泊作业需求,填补研究空白并为港口实际投产使用纯电动拖轮提供理论依据和数据支撑。在后续工作中,还会考虑拖轮引航、伴航和船舶移泊等复杂作业需求,在模型中更加丰富拖轮实际日常作业场景,使对纯电动拖轮的碳减排效果评估更为准确具体。此外,从港口碳减排角度出发,考虑在港区拖轮船队混合使用柴油拖轮和纯电动拖轮,寻求油电混合拖轮船队的最优比例及最佳调度模式,也是未来极具价值的研究方向。

参 考 文 献

[1] 张进峰,马伟皓,刘永森,等. 考虑营运成本和排放的船舶航速多目标优化模型[J]. 中国航海, 2017, 40(1): 129-134.
ZHANG J F, MA W H, LIU Y S, et al. A multi-objective optimization model for ship speed considering operating cost and emission [J]. China Navigation, 2017, 40(1): 129-134. (in Chinese)

[2] 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 on harbor craft tugboats [J]. Ship Power Technology, 2022, 42(8): 53-56. (in Chinese)

[3] 叶进京. 厦门港购建新能源拖轮可行性分析[J]. 中国港口, 2022(8): 51-53.
YE J J. Feasibility analysis of purchasing and building new energy tugboats in Xiamen Port [J]. China Port, 2022(8): 51-53. (in Chinese)

[4] 张圣超,李亚楠,王驰明,等. 绿色混合动力拖轮现状及设计方案[J]. 机电设备, 2021, 38(6): 99-106.
ZHANG S C, LI Y N, WANG C M, et al. Status and design solutions of green hybrid tugboats [J]. Electromechanical Equipment, 2021, 38(6): 99-106. (in Chinese)

[5] 孟嗣斐,陈德富,顾林林,等. 柴电混合拖轮动力系统试验台设计及试验研究[J]. 柴油机, 2019, 41(1): 40-43.
MENG Z F, CHEN D F, GU L L, et al. Design and experimental research of diesel-electric hybrid tugboat power system test bench [J]. Diesel Engine, 2019, 41(1): 40-43. (in Chinese)

[6] KUMAR B A, SELVARAJ R, CHELLIAH T R, et al. Improved fuel-use efficiency in diesel-electric tugboats with an asynchronous power generating unit [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(2): 565-578.

[7] KUMAR B A, SELVARAJ R, DESINGU K, et al. A coordinated control strategy for a diesel-electric tugboat system for improved fuel economy [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5439-5451.

[8] CHUA L W Y, TJAHJOWIDODO T, SEET G G L, et al. Implementation of optimization-based power management for all-electric hybrid vessels [J]. IEEE Access, 2018, 6: 74339-74354.

[9] THANH L V, AYU A A, DHUPIA J S, et al. Power management for electric tugboats through operating load estimation [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(6): 2375-2382.

[10] KOZNOWSKI W, EBKOWSKI A. Analysis of hull shape impact on energy consumption in an electric port tugboat [J]. Energies, 2022, 15(1): 339.

[11] GAO J J, LAN H, CHENG P, et al. Optimal scheduling of an electric propulsion tugboat considering various operating conditions and navigation uncertainties [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022,

- 10(12): 1973.
- [12] ZHU S, GAO J, HE X, et al. Green logistics oriented tug scheduling for inland waterway logistics [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 49: 101323.
- [13] ZHONG H L, ZHANG Y G, GU Y M. A bi-objective green tugboat scheduling problem with the tidal port time windows[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 110: 103409.
- [14] 刘逸卓. 基于 Gurobi 数学规划的建筑户型布排优化 [J]. *住宅产业*, 2021(7): 36-38.
LIU Y Z. Optimization of building house type arrangement based on Gurobi mathematical planning [J]. *Residential Industry*, 2021 (7): 36-38. (in Chinese)
- [15] 宋晨晨. 面向智慧航道的传感网布局规划与能效优化 [D]. 大连: 大连海事大学, 2021.
SONG C C. Sensor network layout planning and energy efficiency optimization for smart waterways [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021.
- [16] CHEN S K, MENG Q, JIA P, et al. An operational-mode-based method for estimating ship emissions in port waters [J]. *Transportation Research Part D*, 2021, 101: 103080.
- [17] 杨超, 王锋, 门明. 征收碳税对二氧化碳减排及宏观经济的影响分析 [J]. *统计研究*, 2011, 28(7): 45-54.
YANG C, WANG F, MEN M. Analysis of the impact of carbon tax on carbon dioxide emission reduction and macroeconomics [J]. *Statistical Research*, 2011, 28 (7): 45-54. (in Chinese)
- [18] 郑岩. 环渤海远洋船舶排放清单研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZHENG Y. Study on the emission inventory of ocean-going vessels around Bohai Sea [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)

Autonomous Transportation Research (自主交通研究) 新刊预告

交通基础设施的数字化、智慧化, 交通运输装备的智能化、自主化和交通系统综合化、自主化研究越来越得到学术界的重视, 催生交通运输领域的新业态。在此背景下, *Autonomous Transportation Research* (ATR, ISSN 为 3050-8622, 中文名称为自主交通研究) 应运而生。ATR 期刊是由武汉理工大学主办, 水路交通控制全国重点实验室、国家水运安全工程技术研究中心、交通信息与安全教育部工程研究中心等协办, 科爱出版社出版发行的英文开放获取式 (Open Access, OA) 高水平学术期刊。ATR 期刊由中国工程院院士、武汉理工大学严新平教授和葡萄牙工程院院士、里斯本大学 Carlos Guedes Soares 教授担任主编。

作为自主交通系统性研究的同行评议期刊, ATR 期刊致力于搭建连接理论与工程应用的桥梁。期刊专注于运载装备 (或系统) 的自主化和陆地、水域、空中等各种交通运输系统的运行智能控制、人机协同控制等相关领域具有原创性、前瞻性和高学术价值的基础研究、关键技术与工程应用。刊登各种智能、无人、自主运载装备 (或系统) 及相关交通系统的感知、决策、控制等方面的理论、方法、模型、算法和集成应用等学术研究成果, 旨在促进自主交通研究的学术交流、推动自主交通系统发展。

ATR 期刊第一届编委会由来自中国、美国、英国、葡萄牙、法国、德国、波兰、意大利、新加坡、西班牙、比利时、澳大利亚、丹麦、巴西、土耳其等 15 个国家和地区的 61 名知名学者组成, 包括国内外院士 8 人, 国内编委 34 人, 国际编委 27 人。

ATR 期刊的创刊为自主交通研究提供了学术交流平台, 促进了理论研究走向工程应用, 以实现交通系统的安全、绿色、高效。



ATR 期刊将于 2025 年 9 月首期出版, 欢迎各位专家、学者关注并投稿!



欢迎进一步了解 ATR 期刊, 请随时联系期刊编辑部

联系人: 刘炯炯 手机号: 13797029928 E-mail: atr@whut.edu.cn

编辑部地址: 湖北省武汉市和平大道 1178 号武汉理工大学余家头校区

期刊网站: <https://www.keaipublishing.com/en/journals/autonomous-transportation-research/>