

基于 LCA 的穿梭油轮船型优化 碳减排效果比较分析

范世东¹, 牛亚桢², 许东方³, 汪瞻纬¹, 韩志强^{2,3,4*}

(1. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063;

3. 舟山中远海运重工有限公司, 浙江 舟山 316131;

4. 浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 船型优化等绿色船舶技术在船舶营运阶段能效提升方面的应用研究广泛, 但船舶建造阶段和拆解阶段的环境评价相关研究不足, 因此难以从全生命周期角度评估绿色船舶技术在环境影响方面的贡献度。针对该问题, 以 15 万吨级苏伊士型穿梭油轮为研究对象, 对其因船型优化引起的全生命周期中的能源与物料差异进行试验测量与统计分析, 然后基于生命周期评估(LCA)方法, 使用 SimaPro V9.6 软件进行环境影响评价, 分析船型优化对全球增温潜势(GWP)的影响和对碳减排的贡献度。结果表明: 首先, 船型优化技术在船舶制造阶段的碳减排贡献度要高于营运阶段, 营运阶段高于拆解阶段, 因此全面评价绿色船舶技术的碳减排效果不仅应考虑船舶营运阶段还应考虑船舶建造和拆解阶段。其次, 就船型优化技术对营运阶段的碳减排效果而言, 尽管 LCA 与船舶能效设计指标(EEDI)两种方法的结果显示出大体相同的趋势, 但 LCA 结果比 EEDI 结果更保守, 原因是两种方法在船舶实际工况设定条件上有些差异, 并且 LCA 主流数据库中 Ecoinvent-3 中碳排放因子的定义对其燃料燃烧过程考虑不充分。

关键词: 穿梭油轮; 船型优化; 生命周期评估(LCA); 碳排放; 船舶能效设计指标(EEDI)

中图分类号: U674.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.015

Comparative analysis of decarbonization effect of hull form optimization to a shuttle tanker based on life cycle assessment

FAN Shidong¹, NIU Yazhen², XU Dongfang³, WANG Zhanwei¹, HAN Zhiqiang^{2,3,4*}

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430063, China; 3. Zhoushan COSCO Shipping Heavy Industry Co., Ltd., Zhoushan 316131, China;

4. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: The application of green ship technologies, such as hull form optimization, has been widely studied for improving energy efficiency during ship operation. However, environmental evaluations of the shipbuilding and scrapping stages remain insufficient, making it difficult to assess the lifecycle environmental impacts of these technologies holistically. To address this gap, this study selects a 150,000-ton shuttle tanker as the research object. Experimental measurements and statistical analyses were conducted to quantify differences in energy and material consumption over the ship's lifecycle

收稿日期: 2025-01-08

基金项目: 浙江省重点研发计划(2017C0116)资助

作者简介: 范世东(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为船机修造工艺及作业支持智能化、设备可靠性及运维保障、疏浚技术与装备。*通信作者: hzq910413@zjyou.edu.cn

引用格式: 范世东, 牛亚桢, 许东方, 等. 基于 LCA 的穿梭油轮船型优化碳减排效果比较分析[J]. 中国航海, 2026, 49(1): 144-154.

FAN S D, NIU Y Z, XU D F, et al. Comparative analysis of decarbonization effect of hull form optimization to a shuttle tanker based on life cycle assessment[J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 144-154. (in Chinese)

resulting from hull form optimization. Using the Life Cycle Assessment (LCA) method implemented in SimaPro V9.6 software, an environmental impact assessment was performed to analyze the effects of hull form optimization on Global Warming Potential (GWP) and its contribution to carbon emission reduction. The results indicate firstly that the carbon reduction contribution of hull form optimization is highest in the shipbuilding stage, followed by the operation stage, and lowest in the scrapping stage. This suggests that a comprehensive evaluation of green ship technologies should account for not only the operational phase but also the construction and dismantling phases. Furthermore, while both LCA and the Energy Efficiency Design Index (EEDI) methods show broadly consistent trends in assessing the carbon reduction effect of hull form optimization during operation, the LCA results are more conservative. This discrepancy arises partly from differences in operational condition assumptions and the fact that the carbon emission factors in the Ecoinvent-3 database, commonly used in LCA, do not fully account for fuel combustion processes.

Key words: shuttle tanker; hull form optimization; LCA; carbon emission; EEDI

随着全球气候变化问题的日益严重,各行业越来越注重产品的绿色性能与可持续性。船舶行业也不例外,航运业碳排放高、污染严重的问题迫使船舶设计建造技术革新,绿色船舶也随之蓬勃发展。绿色船舶^[1]是指在船舶的设计、建造、运营和拆解过程中,秉承资源节约和环境友好的理念,在满足船舶应有的航行、运输、作业及再利用功能的同时,消耗最少的资源,产生尽可能少的环境污染和生态扰动。目前,散货船、集装箱船、油轮、LNG 和 LPG 气体运输船、用于较远海上油田石油运输的穿梭油轮等运

输船都在向绿色低碳方向发展。

绿色船舶技术的应用研究比较活跃。WANG 等^[2]使用不同的优化算法确定客货船的主尺度,对船型进行了优化。姚丹丽^[3]通过数据挖掘确定大型邮轮船型优化减少的阻力,提升大型邮轮的航行性能。NGUYEN 等^[4]对散货船安装节能装置进行优化,用以提升该船舶的能效。图 1 是采用 VOS viewer 软件可视化分析中国知网(CNKI)中近 20 年 2 000 篇以降低碳排放为目的的绿色船舶技术文献,结果表明船型优化是国内的研究重点。

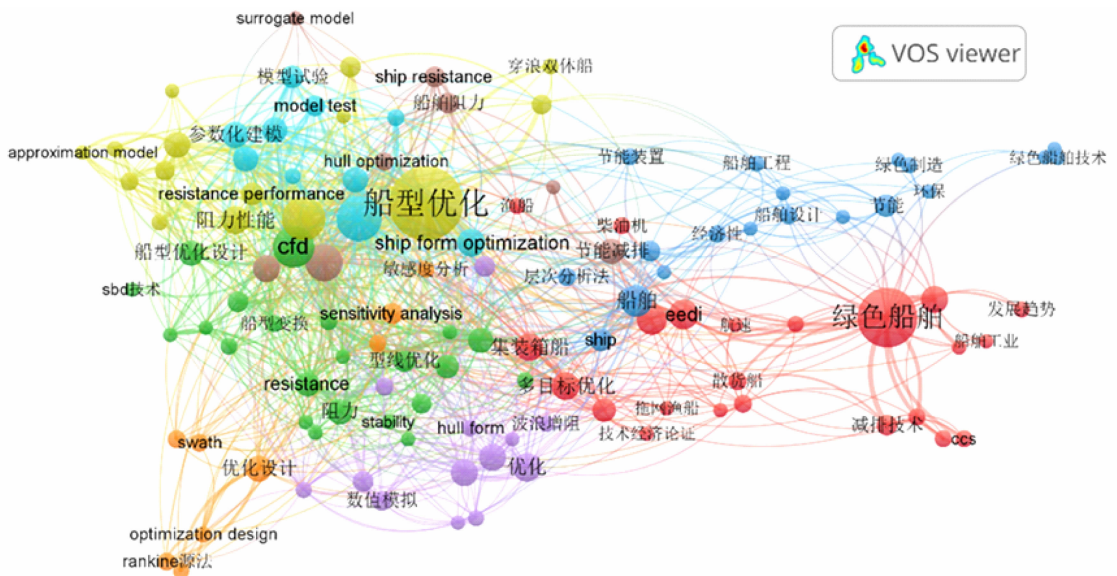


图 1 基于 VOS viewer 的绿色船舶技术文献统计与分析结果

Fig. 1 Statistics and analysis results of green ship technology literature based on VOS viewer

从图 1 可知,目前学者对绿色船舶技术的研究与船舶能效设计指标(Energy Efficiency Design Index, EEDI)有紧密的联系。国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)针对降低船舶碳排放制定并采取了一系列政策和措施,用于推动船舶行业实施能效管理,如针对新造船的 EEDI、针对现有船舶的能效指数(Energy Efficiency Existing Ship

Index, EEXI)等。对于船舶的设计,由 IMO 提出并强制执行的 EEDI 已经作为船舶碳排放的重要衡量指标,该指标以船舶在标准运营条件下的每单位运输工作量的能源消耗来衡量船舶的能源效率。根据船舶在设计最大载货状态下,以主机最大功率的 75% 航速航行所需推进动力以及相关辅助功率所消耗的燃油计算出的 CO₂ 排放量,可以清楚地反映某

一船舶在设计建造阶段可采取措施降低运行阶段的碳排放水平^[5]。石峰等^[6]研究了载重量、主机功率和航速三个因素对近海油轮 EEDI 折减效果的影响,为该类船控制 CO₂ 排放和提高自身性能提供依据。李哲^[7]针对 30 万 t 油轮的 EEDI 单变量和多变量敏感度进行分析,为船舶能效的优化设计提供参考。

EEDI 针对船舶营运阶段的碳排放,没有考虑船舶制造和报废阶段。为了从全生命周期角度全面地评价船舶碳排放,很多学者将生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)方法应用到船舶领域^[8-11]。该方法综合考虑了原材料制造、船舶建造、营运以及报废拆解等阶段,评估船舶从设计出厂到报废拆解全过程的环境影响。杨涛^[12]基于 LCA 方法进行研究和范围界定,通过能量消耗模型及气体排放模型的数据,分析其结果并提出改进措施。韩志强等^[13]使用 LCA 方法判断玻璃钢渔船结构设计余量对大气污染造成的影响。孙德平等^[14]通过直接营运与间接应用两方面分析 LCA 方法应用于船舶燃料评估的可行性。CUCINOTTA 等^[15]使用 LCA 评价了多种船舶不同燃料的环境影响,增强了对这些燃料环境影响的理解。与上述研究趋势一致,IMO 在 2023 年开始执行《船用燃料全生命周期温室气体和碳强度指南》(LCA 指南),说明在船舶领域目前国际上已经开始重视 LCA 的使用。该评价方法可以为船舶碳强度计算提供基础数据,以评价绿色船舶的可持续性。

对国内外研究现状进行总结发现,目前船型优化等绿色船舶技术在营运阶段的能效提升效果方面应用研究广泛,但在全生命周期的效果评价方面存在不足。而 LCA 作为全面评价产品碳排放的方法已经开始在船舶领域应用,因此本文使用 LCA 方法,对船型优化降低的碳排放进行评价。由于碳排放与 IMO 强制性法规 EEDI 极度相关,所以本文将评价结果与已有的 EEDI 结果进行对比,以反映 LCA 的可信度并探究船型优化在包含船舶制造阶段和拆解阶段在内的全生命周期中对降低碳排放的贡献。

1 研究方法

以舟山中远海运重工有限公司建造的 15 万吨级穿梭油轮为研究对象,基于 LCA 方法,在该船全生命周期的条件下,基于“排放因子乘活动数据的规则”核算该船船型优化前后产生的 CO₂ 变化量,见式(1),分析船型优化技术在降低碳排放方面的效果。

$$E = \sum Q_i F_i \quad (1)$$

式(1)中, E 为某种环境影响评价的结果; Q_i 为某种环境下排放物质*i*的排放量; F_i 为某种环境下排放物质*i*的排放因子。

为了核算该船在全生命周期下产生的 CO₂ 量,借助国际上主流的 LCA 商用软件 SimaProV 9.6 进行分析,选择软件中 Ecoinvent-3 数据库中的碳排放因子进行计算,将结果中全球变暖潜势(Global Warming Potential, GWP)选为评价指标。边界范围设定为穿梭油轮的设计建造阶段、营运阶段和报废拆解阶段,主要清单包括船舶制造所需能源、原材料开采和制造,营运阶段的燃油消耗量,报废拆解阶段的能源消耗和物料回收等。建造阶段的能源与物料数据是通过统计船厂制造过程原材料消耗,在制造车间内加装气体流量传感器和电表等测量装置后测量获得。营运阶段的燃油消耗是通过分析基于船讯网 AIS 的船舶航速、吃水等数据变化,根据主、辅机燃油消耗曲线估算获得。

如前所述,EEDI 是 IMO 制定众多降低船舶碳排放、提升能效的指标之一。本文将基于 LCA 的船型优化对降低碳排放的分析结果与基于 EEDI 方法的船型优化对能效提升结果进行对比分析,研究两种方法的差异性(见图 2)。

2 示例船船型优化介绍与 EEDI 计算

2.1 目标船舶选型

本文的示例船舶是一艘 15 万吨级苏伊士穿梭油轮,该船专用于海上油田向内陆运输石油。该船为系列船舶,目前已建造 6 艘,入级挪威船级社,无限航区。表 1 为穿梭油轮的主尺度、航速等相关信息。

2.2 船型优化介绍

本节简单介绍示例船舶的船型优化过程及结果。通过对同系列已建船舶船型尺寸进行统计,使用 NAPA 软件型线变换分析可得该船型的最优尺寸。其中,船舶横剖面面积曲线是衡量型线优劣的重要特征曲线,其进流段与去流段的长度、浮心纵向位置等都与船舶的快速性关系密切。为了减少由于船体尾部边界层分离而导致的能量损失,低速肥大型船舶的浮心纵向位置 LCB 一般位于舯前 2.0% L_{pp} ~ 3.5% L_{pp} ,且取值受主尺度、方形系数、航速等因素的影响^[16],综合考虑,本船将该船浮心纵向位置设定在舯前 2.9% L_{pp} 处。

对穿梭油轮型线进行优化降低了船舶水下湿表



图2 研究方法

Fig. 2 Research methodology

表1 穿梭油轮主尺度等信息

Tab. 1 Shuttle tanker master scale and other information

项目	数值	项目	数值
总长/m	278.90	载重吨/t	153 510
垂线间长 L_{pp} /m	265.00	主机数量及最大持续功率(MCR)/kW	1台 16 060
型宽/m	47.00	主机 75% MCR 油耗/(g/kW·h)	162.31
型深/m	24.90	发电机数量及 MCR/kW	4台 4 000 1台 1 600
设计吃水/m	16.00	发电机 50% MCR 油耗/(g/kW·h)	198
结构吃水/m	17.30	续航力/n mile	20 000
空船质量/t	31 309	设计航速/kn	14.25

面积,减少了船舶航行时的摩擦阻力,增加了航速,同时也可以减少船体建造中钢材的使用量。使用 CFD 软件数值模拟对比船体周围流场的压力分布、流线等方面对阻力的影响,分析结果得出优化后尾轴附近流场的流线分布更加均匀,压力梯度显著降低,降低了边界层分离的程度,有效减小了船体阻力(见图 3、图 4)。为了验证型线优化降低阻力后对航速的影响,随后进行的船舶拖曳试验结果与 CFD 结果相一致,在穿梭油轮满载、主机功率为 75% MCR 情况下,船型优化后的航速为 14.25 kn,比优化前提升了 0.21 kn,结果已被船级社认证^[16](见图 5)。

2.3 EEDI 计算

《新船能效设计指数(EEDI)计算方法》中对 EEDI 的计算公式进行了规定,如公式(2)所示。公式中分子部分表示船舶的 CO₂ 排放量,分母部分则表示船舶在设计航速下的总运输量,即 EEDI 值表示运输每吨货物所产生 CO₂ 排放量^[5]。将表 2 中数据代入公式(2)可得,优化前的 EEDI 值为 3.069,

优化后的 EEDI 值为 3.017^[17]。

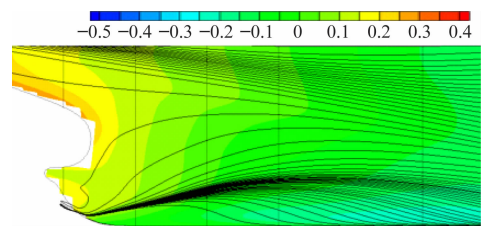


图3 优化前船体表面流线和压力分布^[16]

Fig. 3 Hull surface flow lines and pressure distribution before optimization

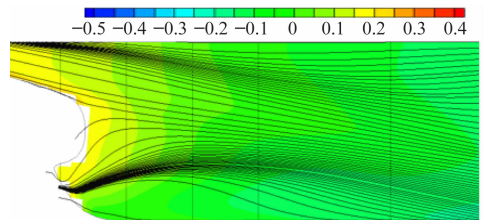


图4 优化后船体表面流线和压力分布^[16]

Fig. 4 Hull surface flow lines and pressure distribution after optimization



图5 示例船舶拖曳试验

Fig. 5 Example ship towing experiment

$$E_{\text{attained}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{nMK} P_{M(i)} \cdot C_{F(i)} \cdot S_{M(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot S_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot C \cdot f_w \cdot v_{\text{ref}}} \quad (2)$$

式中： $P_{M(i)}$ 是主机功率(kW)； $C_{F(i)}$ 为主机燃料热值(t-CO₂/t-Fuel)； $S_{M(i)}$ 为主机油耗(g/kW·h)； P_{AE} 为发电机功率(kW)； C_{FAE} 为发电机燃料热值(t-CO₂/t-Fuel)； S_{AE} 为发电机油耗(g/kW·h)； f_i 为共同规范引起的舱容系数； f_c 为舱容系数； C 为载重吨(t)； f_w 为海上减速系数； v_{ref} 为航速(kn)。

表2 示例船舶船型优化后的 EEDI 计算数据

Tab. 2 Calculated EEDI data after optimization of the example vessel's shape

变量	数值	变量	数值
P_M/kW	11 550	P_{AE}/kW	635
$S_M/(\text{g}/\text{kW} \cdot \text{h})$	168.27	$S_{AE}/(\text{g}/\text{kW} \cdot \text{h})$	198
$C_F/(\text{t-CO}_2/\text{t-Fuel})$	3.206	$C_{FAE}/(\text{t-CO}_2/\text{t-Fuel})$	3.206
f_i	1.015	f_c	1
C/t	152 268.3	f_w	1
v_{ref}/kn	14.25		

3 LCA 评价

LCA 是一种适用于评估产品或服务整个生命周期内环境影响的方法。对穿梭油轮进行 LCA 评价需要综合考虑从原材料制造、船舶建造使用到报废处理的全过程,以评估船舶从设计出厂到报废处理整个过程的环境影响。完整的 LCA 评价包括目标定义与范围、清单分析、影响评价和结果解释四个步骤(见图6)。如图6所示,以船型优化对船舶全生命周期的碳排放降低效果分析为目标,以船舶全生命周期为范围,对船型优化技术导致的能源、物料的变化量进行统计,选择 Ecoinvent-3 数据库碳排放因子对能量和原材料的输入及其排放环境的影响进行清单分析。采用 ReCiPe Midpoint(H)方法,对所得清单数据进行影响评价,选择 GWP 作为评价指标,该方法用于评价温室气体对大气 100 年的影响。

3.1 目标定义与范围

本文进行穿梭油轮“全生命周期”环境影响评价是为了量化分析穿梭油轮船型优化技术对降低碳排放的效果,即船型优化后船舶制造(涵盖原材料制造和运输)、营运、报废拆解等各阶段的能源(电力、燃油等)、物料(钢材、油漆等)消耗对环境负荷的影响。

3.2 清单分析

清单分析是评估产品或服务在其整个生命周期内对环境的关键步骤,量化原材料、能源等资源的输入和废气、废水等环境排放物的输出,为后续的环境影响评价提供基础数据。

3.2.1 制造阶段

船型优化后由于船体形状改变,船舶制造阶段使用的钢材量会发生变化。船型设计结束后才会进行结构设计,所以假设船型优化前后所用的钢板材料类型和板厚不变。由于船型优化改变了船体外表面形状,导致钢材使用总量发生变化,焊接、涂装等工艺的物料、能源消耗也随之改变。

对船舶制造车间穿梭油轮分段制造过程中原材料的使用量进行统计汇总,得到钢材和涂料的使用量。通过对车间内焊机加装气体流量、电流和电压传感器,测得制造过程中主要几种焊接方式单位长度所消耗的焊材、保护气体和用电量(图7、图8),再与船舶 3D 模型导出的多组焊接方式的焊缝总长度相乘,得到焊接工艺总物料与能源的消耗。用于板材切割的天然气与氧气等按照同样方法测量获得,结果如表3所示。

3.2.2 营运阶段

船舶营运阶段涉及的清单分析主要为燃油消耗

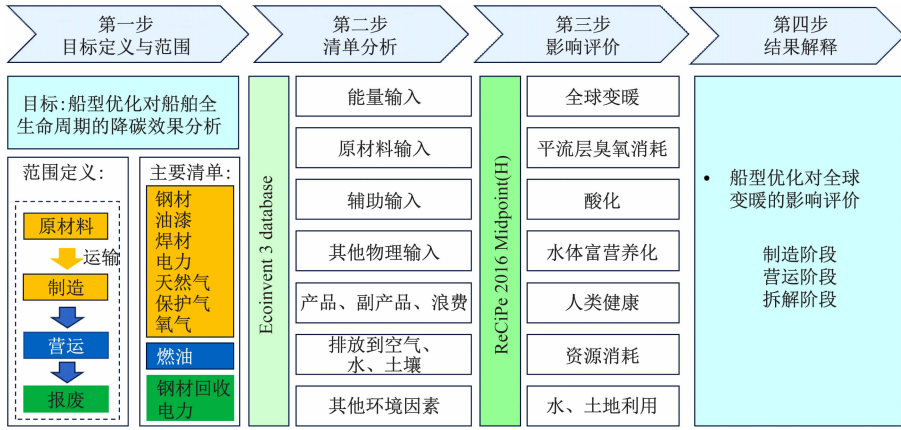


图 6 基于 LCA 方法的 15 万吨穿梭油轮 GWP 评价方法过程

Fig. 6 A methodological process for evaluating the GWP of 150,000 tons shuttle tankers based on the LCA methodology



图 7 焊接作业部分测量设备

Fig. 7 Measuring equipment for welding operations section

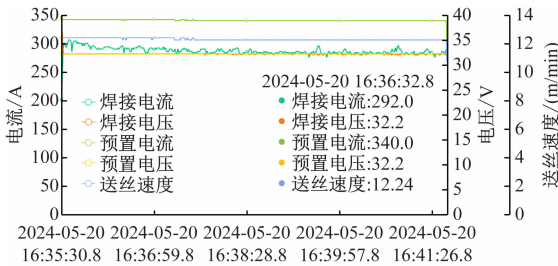


图 8 焊接作业部分试验测量结果(电压、电流、送丝速度等)

Fig. 8 Results of experimental measurements in the welding operation section (voltage, current, wire feed speed, etc.)

表 3 制造阶段清单分析结果

Tab.3 Manufacturing phase inventory analysis results

主要清单	优化前	优化后	差值
制造电能/kW·h	7 602 520	7 240 000	362 520
钢材/t	26 039	24 798	1 241
油漆/L	325 772	311 198	14 574
焊材/kg	579 734	552 090	27 644
二氧化碳/m ³	96 270	91 680	4 590
天然气/m ³	53 850	51 283	2 567
氧气/m ³	167 080	159 114	7 966

量。由于该船暂无服役期满案例,且船舶的实际燃油消耗量少有公开,因此,只能估算其油耗量。一般船舶的服役年限为 30 年,所以本文假定穿梭油轮预

计使用年限也为 30 年,估算该船舶 30 年的燃油消耗量。另外,船舶营运阶段也会涉及船舶修理,但是由于该船暂无全生命周期维修过程及次数记录案例,对全生命周期修理过程中的物料与能源无法准确估计,因此暂不考虑修理。

对于穿梭油轮航行时的油耗量估算,借助设计阶段得到的“随航速变化的阻力与主机功率变化的结果”构建统计模型后,基于 AIS 的船舶航行阶段航速、载货量(吃水)变化等活动数据进行估算。根据穿梭油轮的 AIS 数据,在航、锚泊、靠泊是该船舶的最主要工况。对营运中穿梭油轮统计发现,航行时除主机工作外,还有两组辅机运行,锚泊与靠泊时只有两组辅机运行。

关于示例船舶,设计阶段曾进行船型优化前后的拖曳试验,该试验涉及不同吃水条件下(设计吃水 = 16 m、结构吃水 = 17.3 m、压载水状态吃水 = 8.9 m)随航速变化的阻力与功率变化结果。基于统计方法构建了随航速和吃水变化的主机功率拟合方程,如式(3)、图 9a 所示,拟合功率结果添加了 15% 的海洋储备。 R^2 是拟合模型的相关系数,0.96 说明拟合模型能代表 96% 的数据,具有较高的可信度。这种方法是从阻力与功率角度进行拟合,对于其他搭载柴油机的船舶,该方法同样适用。但由于船舶主机型号、船舶航行阻力的差异,拟合公式在推广至其他船舶时,需要对相关系数进行修正。基于该拟合方程(式(4))和主机实测的油耗量拟合曲线(见图 9b)可以估算穿梭油轮航行时主机的燃油消耗量。

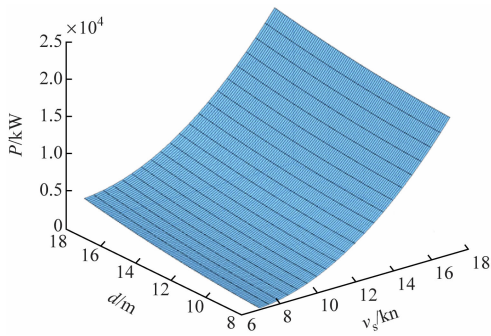
$$P = 162.4 \cdot d^2 - 2092 \cdot d + 17.23 \cdot v_s^2 -$$

$$134.2 \cdot v_s + 6869; R^2 = 0.96 \quad (3)$$

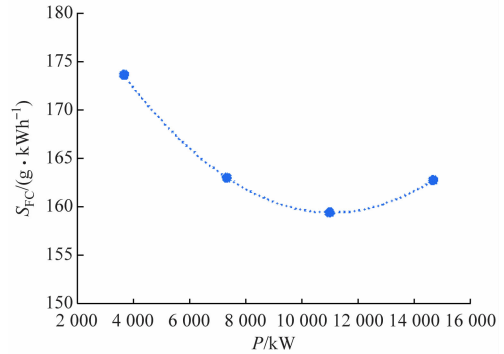
式(3)中: P 为主机功率; d 为吃水深度; v_s 为航行速度。

$$S_{FC} = 3 \times 10^7 \cdot P^2 - 0.0057 \cdot P + 191.1; R^2 = 1 \quad (4)$$

式(4)中: S_{FC} 为燃油消耗速度; P 为主机功率。



(a) 随吃水、速度变化的主机功率拟合模型



(b) 随主机功率变化燃油消耗拟合模型

图 9 主机功率拟合模型和燃油消耗拟合模型

Fig. 9 Fitted model of main engine power and fitted model of fuel consumption

对于辅机的油耗,PERČič等^[18]指出辅机在实际运营时的平均负荷估计为 50%。这时,本文示例船对应的辅机油耗量为 198 g/kW·h,辅机工作功率为 2 000 kW。

船讯网监测并记录了已交付且在营运的同系列穿梭油轮 98 天的航行时长、锚泊时长、航行轨迹、吃水和速度(见图 10)。将统计数据进行分类分析,得到示例船舶有航行记录的 28 天,锚泊与停靠 70 天。共计航行 3 388.46 n mile。根据公式(3)、公式(4)、辅机的油耗信息,得出航行 28 天的油耗为 654 198 kg,锚泊与停靠 70 天的油耗为 559 292 kg。根据这段时间内实际运行耗油量,等比例估算出预计 30 年使用寿命的油耗,结果如表 4 所示。

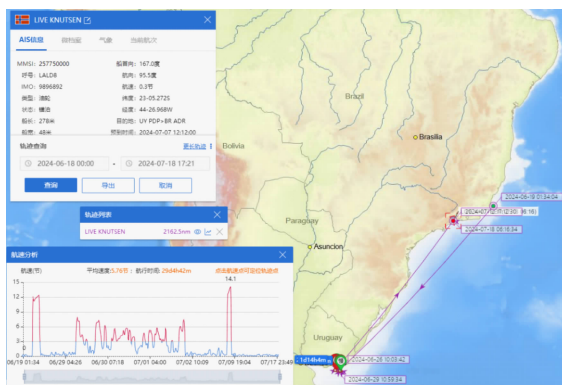


图 10 基于 AIS 的穿梭油轮活动数据统计案例

Fig. 10 A case study of shuttle tanker activity data statistics based on AIS

3.2.3 报废阶段

目前,全球约有 95% 的报废船舶都在发展中国家进行拆解,主要代表为亚洲的发展中国家。孔祥辉^[19]对 2013—2019 年拆解相关数据进行统计并对拆船的主要三个国家使用 LCA 进行评价,结果表明拆解船舶资源回收率达 95.36%,平均拆解一吨船

舶带来 GWP 为 242.37 kg CO₂eq。由于该系列船暂无拆解案例,无法具体获取拆船阶段的能源消耗,因此本文采用上述数据作为穿梭油轮拆船阶段的 LCA 评价依据(见表 5)。

表 4 制造阶段清单分析穿梭油轮 30 年的油耗估算结果

Tab. 4 Estimated fuel consumption of shuttle tankers over 30 years as a result of inventory analysis at the manufacturing stage

项目	工况状态	数值
船讯网统计 (98 天)	在航(28 天)油耗/t	654.198
	锚泊(60 天)、靠泊 (10 天)的油耗/t	559.292
30 年估计	30 年油耗/t	135 588.930
	30 年航行距离/n mile	378 609

表 5 报废阶段清单

Tab. 5 List of end-of-life phases

	优化前	优化后	差值
钢材回收/t	31 087.44	29 856.26	-1 231.18
GWP/kgCO ₂ eq	7 275 443.27	7 588 362.33	312 919.06

3.3 环境影响评价与结果解释

LCA 方法是基于“排放因子乘以活动数据的原则”进行环境影响评价。本文使用 SimaPro V9.6 软件,选择 Ecoinvent-3 数据库,在数据库中找到对应穿梭油轮全生命周期消耗的物料、能源种类与排放因子,进行穿梭油轮 GWP 的核算。表 6 是具体的碳排放因子。

图 11 是使用 SimaPro V9.6 软件计算出的穿梭油轮船型优化对包含全球变暖在内的所有环境负荷

指标的影响评价的特征化结果。该结果是根据表 6 中列出的排放因子和 3.2 节基于船型优化前后能源与物料差值的数据相乘得到的结果。结果表明,船型优化引起的制造阶段钢板使用量的减少在环境影响评价 15 个指标中的贡献度最大,船型优化引起的

营运阶段燃油的降低在化石资源匮乏指标中影响最大。全球变暖指标与碳排放相关,与船型优化也相关,优化后穿梭油轮营运阶段碳排放最大,占比约 68%,制造阶段占比约 29%,拆解阶段占比约 3%。优化前的结果与之相似,不再叙述。

表 6 穿梭油轮船型优化涉及的主要清单的碳排放因子汇总

Tab.6 Summary of carbon emission factors for major inventories involved in the optimization of shuttle tanker ship form

主要清单	碳排放因子	来源
制造阶段	钢材	2.02 kg CO ₂ eq/kg
	电力	0.912 kg CO ₂ eq/kW · h
	油漆	6.78 kg CO ₂ eq/kg
	焊接	0.319 kg CO ₂ eq/m
	天然气	0.761 kg CO ₂ eq/m ³
	氧气	1.15 kg CO ₂ eq/kg
营运阶段	燃油	1.09 kg CO ₂ eq/kg
		3.206 kg CO ₂ /kg
报废阶段	拆解	242.37 kg CO ₂ eq/t

注:CO₂ eq 为所有温室气体(CO₂、CH₄、N₂O 等)折合二氧化碳当量。

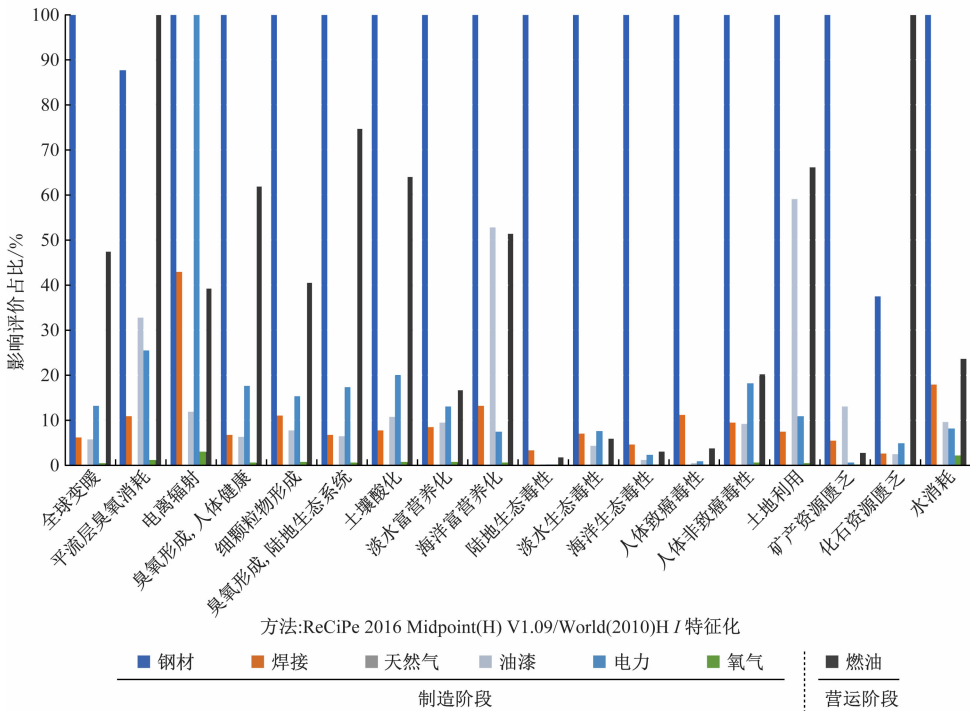


图 11 船型优化对全球变暖等环境负荷指标的影响评价特征化结果

Fig.11 Characterization results of the evaluation of the impact of ship form optimization on environmental load indicators

图 12 是穿梭油轮制造阶段中,船型优化技术对全球变暖指标影响的分析结果。结果显示,船型优化对制造阶段的全球变暖指标的降低效果主要体现在钢材的使用上,占总体降低效果的近 80%;其次是电力,占 10.54%。

将 LCA 评价结果中各温室气体折合为二氧化碳当量,发现尽管船舶营运阶段的碳排放要远远高于船舶制造阶段和拆解阶段,但是,通过图 13 可知,通过 LCA 核算,对于穿梭油轮船型优化的碳减排贡献,制造阶段要高于营运阶段。对于制造阶段,船型

优化降低了钢材的使用量,其次是降低了建造过程中各种的能源、物料等消耗。报废阶段空船质量的变化导致拆船的工作量降低。船舶营运阶段船型优化引起了油耗的变化。而根据图 11,船用钢板生产阶段的碳排放是燃油的 2 倍多,因此船型优化引起的碳减排效果在制造阶段高于船舶营运阶段。

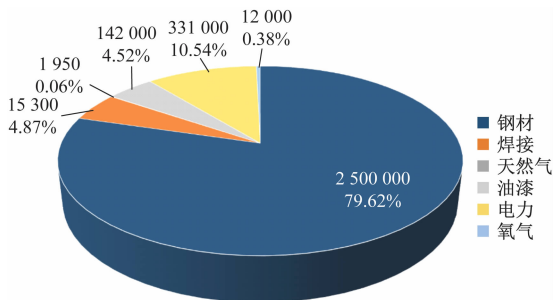


图 12 船型优化对制造阶段的全球变暖指标降低效果占比的分析结果

Fig. 12 Results of the analysis of the share of the effect of ship form optimization on the reduction of global warming indicators at the manufacturing stage

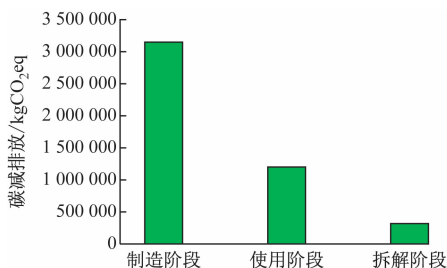


图 13 船型优化对降碳的效果比较

Fig. 13 Comparison of the effect of ship form optimization on carbon reduction

将穿梭油轮船型优化前后的 EEDI 变化值与统计估算穿梭油轮 30 年航行距离、满载货物量依次相乘,得到基于 EEDI 的船型优化降低的 CO₂ 总量。将基于 LCA 的穿梭油轮船型优化前后营运阶段中航行过程的全球变暖指标变化值与基于 EEDI 的结

果进行对比,如图 14 所示。

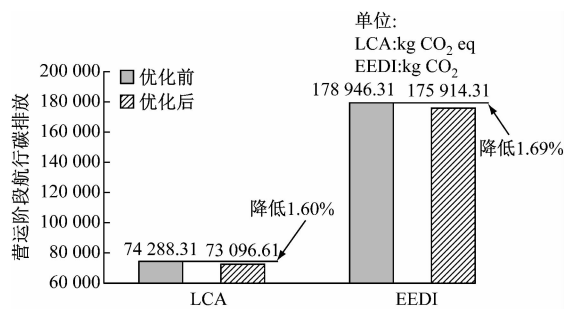


图 14 船型优化对营运阶段航行降碳的效果比较

Fig. 14 Comparison of the effect of ship form optimization on the carbon reduction of navigation during the operation phase

由图 14 知,在营运阶段的航行过程,两种方法对船型优化在降碳贡献度方面降低趋势评价一致, LCA 法降低 1.60%, EEDI 法降低 1.69%, 与其他学者的研究结果趋势相同(见表 7)。但两种方法在碳排放量计算上存在一定差异,主要是因为 EEDI 在计算燃油消耗时有满载且使用主机功率 75% 的条件,而在船讯网基于 AIS 的实际航行记录中发现,穿梭油轮多数情况下并未按主机最大功率 75% 航行,且由于该船自身工作属性有 70% 的锚泊工况,锚泊工况下对燃油消耗的为发电机,因此船型优化不能降低该工况下的燃油消耗,这是 EEDI 没法考虑到的。另外,尽管 LCA 核算方法考虑了除 CO₂ 之外的 CH₄、N₂O 等其他温室气体对全球变暖指标的影响,但 EEDI 法对船舶营运阶段的碳减排效果高于基于 LCA 方法的结果,主要原因在于碳排放因子和燃油消耗数据的双重影响。本文使用的 LCA 软件对于燃油燃烧过程并没有完整的考虑;而 EEDI 方法中的碳排放因子,主要考虑的是燃油燃烧阶段中产生 CO₂ 排放量;EEDI 的碳排放因子也要高于 Ecoinvent-3 数据库中的碳排放因子。

表 7 船型优化对阻力降低、能效提升的效果对比分析

Tab. 7 Comparative analysis of the effect of ship form optimization on drag reduction and energy efficiency improvement

研究内容	优化后
船舶主要尺寸区间耦合 ^[2]	单区间优化 EEDI 平均增加 2.11%
基于数据挖掘的大型邮轮船型特征及船型参数分析 ^[3]	最佳船型参数下的邮轮阻力下降了 1.48%
某穿梭油轮船型优化后 EEDI 对比分析 ^[17]	优化后 EEDI 增加 1.7%
基于 NURBS 的船型参数化设计 ^[20]	优化后阻力降低 1.465%
本研究	优化后 EEDI 降碳 1.60%, LCA 降碳 1.69%

4 结 论

本文通过实际调研、现场试验、数理统计等方法获取穿梭油轮优化前后能源、物料差异,使用 LCA 方法对这些差异进行评价以得到船型优化技术对降低穿梭油轮全生命周期碳排放的贡献。使用 EEDI 计算结果对航行阶段进行可信度验证并将两种方法进行对比,确认了 LCA 方法对船舶制造阶段和报废阶段的环境影响评价的可行性。

船型优化后的穿梭油轮,在其全生命周期中,营运阶段碳排放量最大,占比约 68%,制造阶段占比约 29%,拆解阶段占比约 3%。但是,LCA 评价结果显示:就船型优化技术对于碳减排的效果而言,设计制造阶段的碳减排量约是营运阶段的两倍。主要原因是船型优化在建造阶段减少的钢板及焊接对应的碳排放高于营运阶段降低的燃油消耗对应的碳排放。即在考虑船舶绿色技术对碳减排贡献的评价时,不仅要考虑船舶营运阶段,还应考虑船舶建造和拆解阶段,以全面评价绿色船舶技术的碳减排效果。然而,LCA 方法虽然能够评价绿色船舶技术对碳减排的影响,但现有的国际主流 Ecoinvent-3 数据库对燃油燃烧过程考虑不充分,导致 LCA 的核算结果远低于 EEDI 核算结果,尽管在碳减排效果上两种方法趋势相同。

不同船舶类型、主机类型对于燃油消耗也会存在一定的影响,基于不同类型主机的排放测试、实船测试等试验以获取船舶营运阶段实际燃油消耗与碳排放值等相关研究需要进一步开展,其研究结果可改进碳排放因子及补全相应数据库,从而提升 LCA 评价模型的准确性。

参 考 文 献

[1] 中国大百科全书(第三版)总编辑委员会. 中国大百科全书:第三版 交通运输工程[M]. 北京:中国大百科全书出版社,2022.
Editorial Board of Directors. Encyclopedia of China: third edition traffic and transportation engineering[M]. Beijing:Encyclopedia of China Publishing House, 2022. (in Chinese)

[2] WANG H D, HOU Y H, XIONG Y P, et al. Research on multi-interval coupling optimization of ship main dimensions for minimum EEDI[J]. Ocean Engineering, 2021, 237: 109588.

[3] 姚丹丽. 基于数据挖掘的大型邮轮船型特征及船型参数分析[J]. 舰船科学技术,2024,46(6):173-176.
YAO D L. Analysis of characteristics and parameters of

large cruise ship types based on data mining[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(6): 173-176. (in Chinese)

[4] NGUYEN V T, CHANDAR D. Ship specific optimization of pre-duct energy saving devices using reduced order models[J]. Applied Ocean Research, 2023, 131: 103449.

[5] 蔡薇. 绿色船舶技术[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2013.
CAI W. Green ship technology[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2013. (in Chinese)

[6] 石峰, 吴杰. 基于 EEDI 的 8 000 吨级近海油轮节能减排因素分析[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2019, 18(3):31-38.
SHI F, WU J. Analysis of energy saving and emission reduction factors of an 8 000-ton offshore oil tanker based on EEDI[J]. Journal of Nantong Vocational & Technical Shipping College, 2019, 18(3):31-38. (in Chinese)

[7] 李哲. 典型油轮 EEDI 和 EEOI 的实船验证及分析[D]. 大连:大连海事大学,2016.
LI Z. Real tanker verification and analysis of typical oil tanker EEDI and EEOI[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016. (in Chinese)

[8] 周春锋. 基于 LCA 的船舶环境影响评价方法研究与应用[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
ZHOU C F. The methodology research and application on ship environmental impact assessment based on LCA[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)

[9] 梅梦磊. 基于 LCA 的船舶环境影响与能效评价系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
MEI M L. Study on ship environmental impact and energy efficiency evaluation system based on LCA[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)

[10] 蔡薇, 万淑乔, 梅梦磊, 等. 基于 LCA 的船舶能效模型构建及基线拟合[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(5):805-810.
CAI W, WAN S Q, MEI M L, et al. Construction of ship energy efficiency model and baseline fitting based on LCA[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(5): 805-810. (in Chinese)

[11] 蔡薇, 龚宏中, 刘中凯, 等. 基于实用 LCA 的绿色江海直达船型环境负荷分析与方案比选[J]. 船舶工程,2017, 39(8):5-9.
CAI W, GONG H Z, LIU Z K, et al. Environmental load analysis and scheme optimization of green sea-river-

- through ship based on practical LCA [J]. *Ship Engineering*, 2017,39(8):5-9. (in Chinese)
- [12] 杨涛. 基于 LCA 的进口原油海洋运输能源消耗及排放研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
YANG T. Study of energy consumption and emissions of the imported crude oil shipping based on the life cycle assessment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [13] 韩志强, JANG J W, OH D K. 韩国玻璃钢渔船船体结构设计余量及其环境负荷分析[J]. *中国造船*, 2020,61(1):90-100.
HAN Z Q, JANG J W, OH D K. Design margin of composite structures of Korean fishing vessel and assessment of its environmental impact[J]. *Shipbuilding of China*,2020,61(1):90-100. (in Chinese)
- [14] 孙德平,张爽,苑海超,等. 国际海事组织 LCA 导则的应用与发展[J]. *世界海运*,2024,47(6):14-18.
SUN D P, ZHANG S, YUAN H C, et al. Application and development of the International Maritime Organization LCA guidelines [J]. *World Shipping*, 2024,47(6):14-18. (in Chinese)
- [15] CUCINOTTA F, BARBERI E, SALMERI F. A review on navigating sustainable naval design: LCA and innovations in energy and fuel choices [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*,2024,12(3):520.
- [16] 凌乃俊. 苏伊士型穿梭油轮总体设计研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
LING N J. Study of the general design for a Suezmax shuttle tanker [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2015. (in Chinese)
- [17] 周建华,韩志强,朱汉华,等. 某穿梭油轮 EEDI 多方方案优化对比分析[J]. *船海工程*,2023,52(6):77-82.
ZHOU J H, HAN Z Q, ZHU H H, et al. Comparative analysis of ship optimization application effect on EEDI of a shuttle tanker [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2023, 52(6):77-82. (in Chinese)
- [18] PERČIĆ M, VLADIMIR N, FAN A L. Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: a case study of Croatia[J]. *Applied Energy*, 2020,279:115848.
- [19] 孔祥辉. 报废船舶资源回收潜力评估及效益分析[D]. 济南:山东大学,2022.
KONG X H. Potential evaluation and benefits analysis of resource recovery from end-of-life ships [D]. Jinan: Shandong University,2022. (in Chinese)
- [20] 冯佰威,谢恒,张子诚. 基于 NURBS 的船型参数化设计方法及应用研究[J]. *武汉理工大学学报*,2024,46(7):116-122.
FENG B W, XIE H, ZHANG Z C. Application research on hull form parameters design method based on NURBS [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2024, 46(7): 116-122. (in Chinese)