

基于 SA-GA 算法的船舶多目标航速优化研究

霍奕轩¹, 姚崇¹, 柯赞¹, 宋恩哲¹

(1. 哈尔滨工程大学烟台研究院, 山东烟台 264000)

Research on multi-objective speed optimization of ships based on SA-GA algorithm

HUO Yixuan¹, YAO Chong¹, KE Yun¹, SONG Enzhe¹

(1. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264010, China)

Abstract: Speed optimization is an important means for ships to save energy and reduce emissions. The current speed optimization is performed with a single objective, which makes it difficult to satisfy the trade-off between energy efficiency and time. To solve this problem, this paper proposes a multi-objective speed optimization method based on energy efficiency and time. Firstly, the fuel consumption-speed model and the energy efficiency-speed model of the main engine are derived. The average relative errors of the fuel consumption model and the energy efficiency model are 0.0332% and 0.0409%, respectively. Then a SA-GA algorithm based on global search of Genetic Algorithm (GA) and local optimization of Simulated Annealing (SA) is proposed, and the multi-objective speed optimization is carried out by fuel consumption and time, energy efficiency and time respectively. Finally, the comparative analysis of the data before and after the speed optimization shows that when the sailing time increases by about 4.6%, the fuel consumption decreases by 7.90%, and the energy efficiency operation index EEOI decreases by 8.03%. It achieves the effect of balancing trade-offs between reducing fuel consumption, improving energy efficiency, and flight time, provide technical support for intelligent energy efficiency management of ships.

摘要: 航速优化是船舶节能减排的重要手段, 现航速优化以单目标进行导致能效和时间中权衡选择难以得到满足, 针对此问题, 本文提出了一种以能效和时间进行多目标航速优化的方法。首先推导了主机油耗-航速模型和能效-航速模型, 油耗模型和能效模型的平均相对误差分别为 0.0332% 和 0.0409%。然后提出了以遗传算法(Genetic Algorithm, GA)全局搜索和模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)局部优化的 SA-GA 算法, 分别以油耗和时间、能效和时间进行多目标航速优化。结果显示, 在航行时间增加约 4.6% 时, 燃油消耗量降低 7.90%, 能效营运指标(Energy Efficiency Operation Index, EEOI)降低 8.03%。本研究达到了降低油耗、提高能效与航行时间之间的权衡选择的效果, 为船舶智能能效管理提供技术支撑。

关键词: 多目标航速优化; 油耗模型; EEOI; SA-GA 算法; 能耗监测

Key words: multi-objective speed optimization; fuel consumption model; EEOI; SA-GA algorithm; energy consumption monitoring

中图分类号: TK4*** (请查阅中图分类法第 5 版) 文献标识码: A

0 概述

世界上 90% 以上的贸易货物通过海上运输, 相比于航空运输和陆路运输, 水路运输的成本相对较低, 尤其是在长距离和大货物运输方面。这使得水路运输成为国际贸易中最受欢迎的选择之一。然而,

船舶在运输货物过程中需要消耗大量燃油, 并产生 CO₂、NO_x、SO_x 等污染物, 不仅严重污染环境, 而且危害人体健康。根据国际航运公会(International Chamber Shipping, ICS) 和国际海事组织(International Maritime Organization, IMO) 的数据,

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023QE009)

作者简介: 霍奕轩(1998-), 男, 硕士生, 主要研究方向为船舶智能能效管理, E-mail: huoyixuan@hrbeu.edu.cn;

姚崇(联系人), E-mail: yaochong@hrbeu.edu.cn.

全球商船队排放的 CO₂ 约占全球 CO₂ 排放量的 3%，相当于德国等主要发达国家的年排放量。IMO 出台了碳强度指标(Carbon Intensity Indicator, CII)的新规定，该指标将基于航运业的碳排放和运输量，为船舶设置具体的碳强度目标。这将进一步鼓励航运业降低碳排放，促进可持续发展。

降低燃油消耗是减少航运碳排放的重要途径之一。研究发现通过航速优化、航线优化和纵倾优化等方面进行改进可以有效降低燃油消耗。航速优化是通过精确计算船舶的最佳航速，可以在保证准时交付货物的前提下，降低燃油消耗。这需要综合考虑船舶的载重、吃水、海流、风况等因素。Chang 等^[1]根据船舶航速、燃油价格和定期租船费用，提出了 4 种方案来说明减速对船舶营运成本的影响，结果显示在高燃料价格和低租船费用的情况下，减速带来的收益最大；Psaraftis 等^[2]将燃油费用、租船费用、货物库存成本等费用加入到了优化模型中，并考虑了船舶载荷对燃油消耗的影响，证实了最低排放航速和最经济航速不一定相同，进一步降低船舶航速，减少船舶 CO₂ 排放，但这种行为会提高航运企业的营运成本。Yan 等^[3]基于自主开发的大数据分析平台，通过分析相应的环境因素，采用分布式并行 k-means 聚类算法实现精细的路由划分。并通过分析船体、螺旋桨和主机之间的能量传递，建立了考虑多环境因素的船舶能效优化模型。陈前昆等^[4]针对内河船舶在内河航行情况，以减少船舶能效运营指数 EEOI 为目标，建立船舶 EEOI 与主机转速模型，进行优化求解。Fan 等^[5]提出了一种速度配平联合优化方法。采用人工神经网络方法形成联合优化决策数据库，使用动态规划算法计算每段航程的最佳速度。Wei 等^[6]建立远洋船舶航线和航速联合优化模型，为了实现所提出的联合优化模型，设计了一种基于差分算法的启发式方法来获得最优解。

以上研究大多以燃油消耗或经济效益单目标作为航速优化的目标函数。本文通过分析船舶航行过程中阻力和推进力的关系，以及船舶动力系统能量分析建模，推导出船舶油耗-航速数学模型、能效-航速数学模型，建立以最低油耗和航行时间、最高能效和航行时间的多目标函数，然后采用全局搜索能力强的遗传算法与局部收敛速度快的模拟退火算法相结合航速优化 SA-GA 算法对目标函数分别进行求解，得到不同目标下对应航段的最佳航速。充分满足船舶经营者的实时需求，制定并实施适合自身情况的节能减排策略，为航运业的向智能化方向发展做出贡献。

1 船舶航速优化数学模型

1.1 阻力模型

阻力模型是船舶航速优化的重要组成部分，船舶的阻力包含众多因素，但主要阻力为静水阻力、风阻和浅水阻力。

静水阻力主要包括摩擦阻力、附属物阻力、剩余阻力^[7]，船舶的静水阻力可以表示为：

$$R_T = R_f + R_{app} + R_r \quad (1)$$

利用统计回归的方法对大量船型的风洞试验数据进行分析计算，得出了相对精确地计算风阻的经验公式。风阻计算公式如下：

$$R_{wind} = \frac{1}{2} C_{wind} \rho_{air} A_T V_{wind}^2 \quad (2)$$

式中：

C_{wind} 为空气阻力系数；

ρ_{air} 为空气密度；

A_T 为横剖面投影面积；

V_{wind} 为相对风速。

浅水阻力的计算公式为：

$$R_{shallow} = \left(1 + \frac{0.065V_s^2}{\left(\frac{H}{d} - 1\right)\sqrt{d}} \right) R_{deep} \quad (3)$$

式中：

V_s : 船舶静水速度；

H : 水深；

d : 吃水；

R_{deep} : 深水阻力。

因此船舶总阻力为：

$$R = R_T + R_{wave} + R_{wind} + R_{shallow} \quad (4)$$

船舶在匀速航行的时候是一个准静态过程，船舶总阻力 R 与螺旋桨有效推力 T 保持平衡：

$$T = R = T_0(1 - t_1) \quad (5)$$

式中：

T_0 : 螺旋桨推力；

t_1 : 推力减额分数。

1.2 船舶动力系统模型

船舶在静水中保持航速 V_s 行驶时所需要的有效功率为：

$$P_R = R \cdot V_S \quad (6)$$

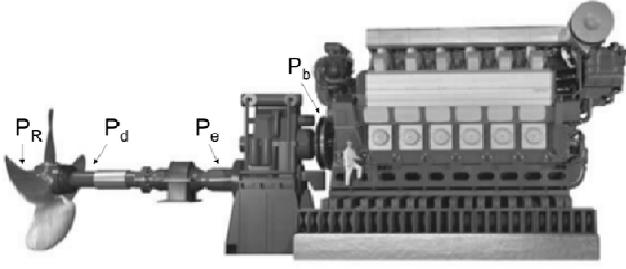


图 1 船舶动力推进系统

船舶推进系统本质上就是一个船-机-桨动力传递模型^[8]，如图 1 所示。主机输出功率为船舶主机的制动功率 P_b ，经过齿轮箱后得到有效输出功率 P_e ，然后经过轴系装置传递到螺旋桨，因此螺旋桨实际收到的功率 P_d 小于主机有效输出功率 P_e ，又由于螺旋桨与水流之间的相互作用，最终转化为船舶克服阻力航向的有效功率 P_R 。考虑齿轮箱、轴系、螺旋桨与水流相互作用等因素，因此从主机输出功率到螺旋桨实际有效功率转换关系如下：

$$P_D = \frac{P_R}{\eta_r \eta_0 \eta_h} \quad (7)$$

$$P_e = \frac{P_D}{\eta_G} \quad (8)$$

$$P_b = \frac{P_e}{\eta_s} \quad (9)$$

$$\eta_h = \frac{1-t_1}{1-w_1} \quad (10)$$

$$\eta_0 = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi} \quad (11)$$

式中：

P_b ：主机输出功率；

P_D ：螺旋桨实际收到的功率；

P_R ：船舶实际有效功率；

η_r ：螺旋桨相对旋转效率；

η_0 ：敞水效率；

η_h ：船身效率；

η_s ：轴系传动效率；

η_G ：齿轮箱效率；

w_1 ：伴流系数。

1.3 油耗-航速模型

船舶螺旋桨推进特性主要反映推力 T 、转矩 Q 、推力系数 K_T 和扭矩系数 K_Q 之间的关系。推力是指螺旋桨产生的向前推进力，而转矩则是螺旋桨在旋

转过程中产生的扭矩，推力和转矩是螺旋桨的两个基本输出量，与船舶推进性能密切相关，以及进速系数 J 的计算公式如下。

$$T = K_T \rho n_p^2 D^4 \quad (12)$$

$$Q = K_Q \rho n_p^2 D^5 \quad (13)$$

$$J = \frac{V_a}{n_p D} = \frac{(1-w_1)V_s}{n_p D} \quad (14)$$

式中：

T ：螺旋桨推力

Q ：螺旋桨转矩

K_T ：螺旋桨推力系数；

K_Q ：螺旋桨转矩系数；

ρ ：水介质密度；

n_p ：螺旋桨转速；

D ：螺旋桨直径；

J ：螺旋桨推进系数；

V_a ：螺旋桨进速。

结合船-机-桨动力模型，以及船舶螺旋桨推进特性关系，可以得到船舶主机发出功率：

$$P_b = \frac{2\pi\rho n_p^3 D^5 K_M}{\eta_s \eta_G \eta_r} \quad (15)$$

然后，便可以计算出瞬时油耗率，计算公式如下：

$$q = P_b g_e = \frac{2\pi\rho n_p^3 D^5 K_M}{\eta_s \eta_G \eta_r} g_e \quad (16)$$

由此可以得到不同发动机转速下不同航行环境下的实时燃油消耗和航行时间。以主机总油耗为优化目标函数；时间、主机转速和航速是主要的制约因素。因此，建立的非线性优化模型如下所示：

$$Q_{\min} = qt = P_b g_e \frac{S_i}{V_s} = \frac{2\pi\rho n_p^3 D^5 K_M}{\eta_s \eta_G \eta_r} \frac{S_i}{V_0 \pm V_w} g_e \quad (17)$$

限制条件：

$$T_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{V_s} < T_{\text{limit}}, i \in (1, 2, \dots, N)$$

$$n_{\min} \leq n_p \leq n_{\max}$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

式中：

q ：传播单位时间油耗；

g_e ：油耗率；

Q_{\min} : 船舶最小总油耗;
 S_i : 航段*i*路程;
 V_0 : 船舶航速;
 V_w : 水速;
 T_{total} : 航次总时间;
 T_{limit} : 航次限制时间;
 n_{\min} : 螺旋桨最低转速;
 n_{\max} : 螺旋桨最高转速;
 V_{\min} : 航行最低航速;
 V_{\max} : 航行最高航速。

1.4 能效-航速模型

EEOI 为船舶在营运过程中单位运输周转量的情况下所排放的 CO_2 量, 即燃油消耗所产生的 CO_2 与运输周转量(货物/人的运输量和航行距离的乘积)的比值, 主要用来衡量计算时期内船舶能效的高低。作为系统能效水平的一个综合指标, EEOI 的计算涉及船舶的自身数据和船舶营运数据, 船舶自身数据主要是累计油耗数据, 如各类燃料的消耗量和各类燃油的 CO_2 转化因子; 船舶营运数据则指船舶的载货量或者载客量, 以及在该航次或航段的航程。计算公式如下:

$$EEOI = \frac{\sum_{ij} FC_{ij} \times CF_j}{\sum_i (D_i \times m_{\text{cargo}i})} \quad (18)$$

式中:

FC_{ij} : 燃料*j*在第*i*个航段中的消耗量;
 CF_j : 燃料*j*类型的燃油量和 CO_2 量转换系数;
 $m_{\text{cargo}i}$: 航段*i*中船舶运输的货物(吨);
 D_i : 航段*i*所载货物做功的距离。

以 EEOI 为优化目标函数; 时间、主机转速和航速是主要的制约因素。因此, 建立的非线性优化模型如下所示:

$$EEOI_{\min} = \frac{2\pi\rho n_p^3 D^5 K_M}{\eta_s \eta_G \eta_r} \frac{S_i}{V_0 \pm V_w} g_e \times CF_j}{S_i \times m_{\text{cargo}i}} \quad (19)$$

限制条件:

$$T_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{V_s} < T_{\text{limit}}, i \in (1, 2, \dots, N)$$

$$n_{\min} \leq n_p \leq n_{\max}$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

2 基于 SA-GA 算法的求解方法

2.1 遗传算法

遗传算法是一种启发式优化算法, 灵感来源于自然进化理论。它模拟了生物进化过程中的选择、交叉和变异等机制。GA 的基本思想是通过构建和维护一个种群, 使用遗传操作(选择、交叉和变异)对种群中的个体进行迭代改进, 以逐步优化问题的解。在每一代中, 个体的适应度(问题的解的质量度量)用于确定选择操作的概率, 较好的解有更高的概率被选择为父代, 从而传递其优良的特征。通过交叉和变异操作, 新的个体被生成, 继续迭代优化过程。GA 适用于优化问题的搜索空间较大且复杂的情况, 可以在较短时间内找到较好的解, 但不保证找到全局最优解。因此在航速优化计算的过程中, 采用遗传算法和模拟退火算法结合的方式进行优化求解。

2.2 模拟退火算法

模拟退火算法是一种全局优化算法, 来源于固体退火原理, 即将固体加温至充分高, 再让其渐渐冷却^[9]。加温时, 固体内部粒子随温度的升高变为无序状, 内能增大; 而徐徐冷却时粒子渐趋有序, 在每个温度上都达到平衡态, 最后在常温时达到基态, 内能减为最小。SA 模拟了物质从高温冷却至低温的过程。SA 包含两个部分即 Metropolis 算法和退火过程, 分别对应内循环和外循环。外循环就是退火过程, 将固体达到较高的温度(初始温度 $T(0)$), 然后按照降温系数使温度按照一定的比例下降, 当达到终止温度 T_f 时, 冷却结束, 即退火过程结束。

模拟退火算法中的 Metropolis 准则是一种有效的重点抽样法, 其算法为: 系统从一个能量状态变化到另一个状态时, 相应的能量从 $E(n+1)$ 变化到 $E(n)$, 其概率为:

$$p = e^{-\frac{E(n+1)-E(n)}{T}} \quad (20)$$

如果 $E(n+1) < E(n)$, 系统接受此状态。否则, 以一个随机的概率接受或者丢弃此状态。状态 $n+1$ 被接受的概率为:

$$P = \begin{cases} 1, E(n+1) < E(N) \\ e^{-\frac{E(n+1)-E(N)}{T}}, E(n+1) \geq E(N) \end{cases} \quad (21)$$

这样经过一定次数的迭代, 系统会逐渐趋于一个稳定的分布状态, 最终求得组合优化问题的整体最优解。模拟退火算法适用范围广, 算法简单, 便

于实现，其搜索方式可有效避免陷入局部最优解，求得全局最优解的可靠性高，适用于航速优化的计算^[10]。

2.3 SA-GA 算法

将遗传算法和模拟退火算法结合可以充分利用它们各自的优点，提高搜索效率和解的质量。在航速优化求解过程中将模拟退火算法作为遗传算法的一部分，用于局部搜索阶段，以细化搜索空间并寻找更优解^[11]。

针对 GA 搜索后期难以通过交叉变异产生新个体，具体做法是在遗传算法的交叉和变异操作中引入 SA 算法的策略，采用一定的概率接受劣解或在局部搜索过程中进行模拟退火迭代。这样可以增加搜索的多样性，避免陷入局部最优解，并有助于全局搜索，获得全局最优解。

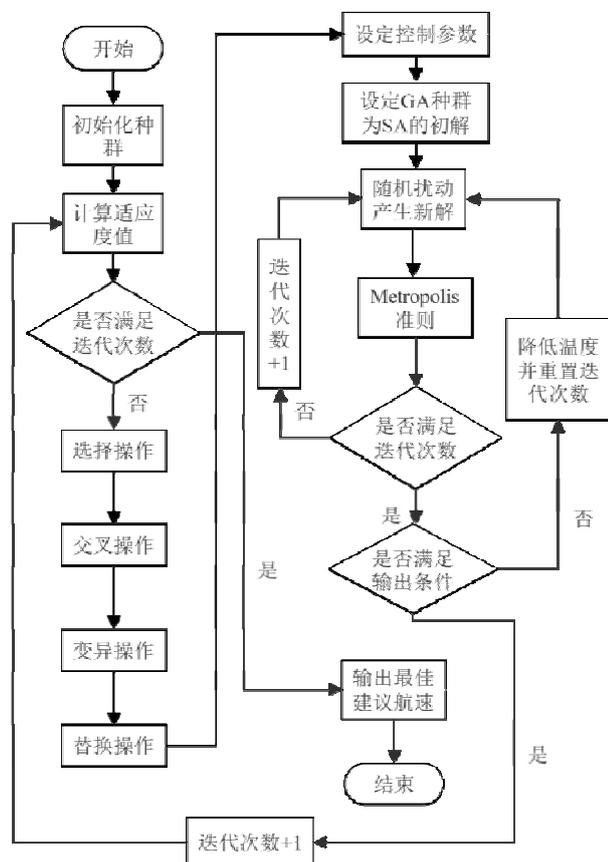


图 2 SA-GA 算法流程图

SA-GA 算法的流程如图 2 所示。整体而言，遗传算法和模拟退火算法的结合可以通过遗传算法的全局搜索和模拟退火算法的局部优化来提高优化问题的求解效果。

2.4 航速优化

航速优化的过程中，将航程按照监测数据采样周期的时间序列航段划分，每 5 分钟的航程划分为

一个航段进行优化，航段分析在船舶航行领域是一种将整个航程划分为多个较小的航段，以便更详细地研究每个航段的特征、要素和相关问题的方法。通过航段分析，可以揭示不同航段之间的差异，如航线选择、航速、燃油消耗、海况、航行时间等，并为船舶运营和航行计划提供优化的机会。

此外，航段分析也可以应用于船舶能效评估和排放控制。通过对每个航段的燃油消耗和排放进行分析，可以确定节能减排的潜力，并制定相应的改进策略，以提高船舶的能效和环境可持续性。

船舶航行领域的航段分析是一种将长航程划分为多个时间段，并进行详细分析研究的方法，有助于了解不同航段之间的差异、优化航线规划、提高船舶能效和确保航行安全。船舶能耗监测设备使用 5 分钟为周期记录数据，其中包括油耗、航速、主机转速和能效指标等关键数据信息。这种周期性的记录允许在船舶航行过程中进行航速优化。通过接收到的航行数据，系统可以根据最低油耗或最高能效为目标，计算出实际航情况下的最佳航速。

3 实例验证

3.1 能效监测和航速优化平台分析

船舶智能能效监测平台主要研究内容包括以下几点内容：

(1) 系统可以自动计算能效及排放指标：CII、EEOI、单位距离 CO₂ 排放、单位运输功 CO₂ 排放、单位距离燃料消耗、单位运输功燃料消耗、每小时燃料消耗量、每日燃料消耗量、航段燃料消耗量和航次燃料消耗量；

(2) 根据船舶设备运行的实际情况，自动判断靠泊、机动航行、定速航行等船舶航行状态；

(3) 利用船舶能耗的实时数据，进行航速优化，并给出建议航速；

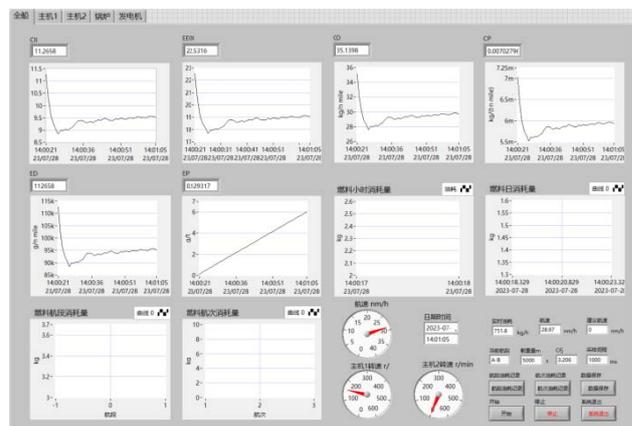


图3 能效监测平台主界面

(4) 根据设定的能耗评估方法和标准进行比较分析, 自动判断能耗状况, 并输出评估结论。

根据以上研究内容, 搭建船舶智能能效监测平台主界面如下图所示, 实现对船舶的实时能效数据监测, 平台主界面如图3所示。

该平台还可以实现对主机、锅炉、发电机等能源消耗设备进行分别监测, 如图4所示, 以便在能耗状况分析时, 综合考虑给出最佳建议。

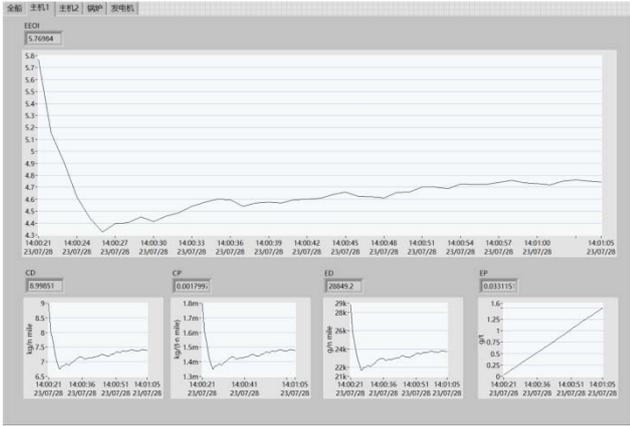


图4 能效监测平台主机监测界面

3.2 航速优化模型验证

本文采用 SA-GA 算法对优化模型进行求解, 得出不同优化目标的优化航速。然后将优化结果与实测值进行对比, 验证优化方法的效果。接着分析对比燃油消耗、能效营运指标关于航行时间对应关系数据, 可在油耗、能效和航行时间之间进行权衡选择, 为船舶在制定航行计划时提供依据, 得到在不同情况下, 按照船东意愿进行不同目标优化, 给出最佳航速优化建议。

本文选择的目标船为某大型集装箱船的实验数据进行航速优化分析。主要参数如表1所示。

表1 目标船参数

序号	类别	参数
1	船长	335m
2	垂线间长	320m
3	型深	24.8m
4	设计吃水	13m
5	设计服务航速	25kn
6	最大载重量	101000t

该船采用一台 MAN-B&W12K98MC-C 型内燃机作为主机, 使用重油为主机燃料(其碳转换系数为 3.114), 主机具体参数如表2所示。

表2 目标船主机参数

序号	类别	参数
1	型号	12K98MC-C
2	冲程	2
3	气缸直径	980mm
4	缸数	12
5	最大连续功率	68520kW*104r/min
6	连续服务功率	61670kW*100.4r/min

结合船舶功率实验数据, 模拟生成船舶航行数据, 然后使用主机油耗模型和能效模型进行验证计算, 每50个航段为一组进行数据分析, 如表3和表4所示, 油耗总体误差为 0.0367%, 平均相对误差为 0.0302%, EEOI 总体误差为 0.0333%, 平均相对误差为 0.0409%, 主机油耗模型和能效模型精确度比较高, 可以用于航速优化分析。

表3 油耗模型和实际油耗量数据对比

航段	实际油耗/t	模型油耗/t	误差率
1-50	17.11	17.12	0.02%
51-100	18.38	18.37	0.02%
101-150	18.09	18.10	0.04%
151-200	18.58	18.58	0.02%
201-250	25.72	25.74	0.11%
251-300	26.06	26.08	0.11%
301-350	25.22	25.24	0.07%
351-400	20.06	20.06	0.01%
401-450	18.39	18.39	0.02%
451-500	18.06	18.07	0.03%

表4 能效模型和实际 EEOI 数据对比

航段	实际平均 EEOI	模型平均 EEOI	误差率
1-50	6.3120	6.3135	0.02%
51-100	6.6179	6.6166	0.02%
101-150	6.5497	6.5521	0.04%
151-200	6.6607	6.6597	0.02%
201-250	8.2102	8.2192	0.11%
251-300	8.2796	8.2886	0.11%
301-350	8.1108	8.1196	0.08%
351-400	6.9745	6.9742	0.004%
401-450	6.6212	6.6201	0.02%
451-500	6.5432	6.5451	0.009%

将相同的航行数据代入, 使用 GA 算法和 SA-GA 算法对能耗和能效模型进行求解, 将结果进行对比分析, 结果如表5和表6所示。

从表5和表6中可以看出, 使用 SA-GA 算法优化的结果航行时间增加量和 GA 算法基本相等, 燃油消耗更低, EEOI 更低。因此说明经过 SA 算法优

化的 GA 算法对油耗降低和能效提高效果更好，因此本文选择 SA-GA 算法进行优化计算。

表 5 油耗模型 GA 算法和 SA-GA 算法结果比较

运行参数	GA 算法	SA-GA 算法
航行时间增加量(%)	2.7751	2.7235
油耗降低量(%)	3.4302	4.7845

表 6 能效模型 GA 算法和 SA-GA 算法结果比较

运行参数	GA 算法	SA-GA 算法
航行时间增加量(%)	2.7417	2.7457
EEOI 降低量(%)	3.5564	4.8736

3.2.1 以油耗为目标的优化结果分析

将油耗-航速模型代入到 SA-GA 求解算法中，通过限制航行时间，我们可以求得对应航行时间下的燃油消耗量，进而求得燃油消耗减少量和航行时间增加量的对应关系图，如图 5 所示。从图中我们可以观察到随着航行时间的增加，燃油消耗量不断减少。因此在实际航行的过程中，我们可以结合实际情况，在燃油消耗量和航行时间之间进行权衡选择，依照船东意愿给出最佳航速建议。

本文中选取图 5 中 A、B、C 和 D 点四种情况下对燃油消耗量-时间进行对比分析，每种情况下，我们都可以得到对应的每一航段的转速，进而可以求得每个航段上的主机燃料消耗量，具体计算结果如表 7 所示。航速优化前后的航速对比如图 6 所示，燃油消耗量对比如图 7 所示。

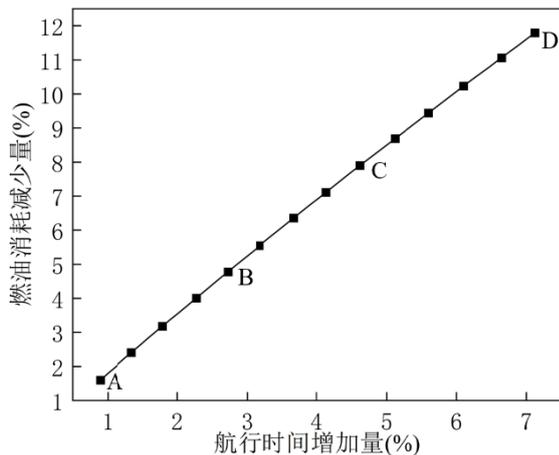


图 5 燃油消耗减少量和航行时间增加量的对应关系图

表 7 以油耗为目标的航速优化计算结果

序号	航行时间增加量(%)	燃油消耗减少量(%)
A	0.8899	1.6006
B	2.7235	4.7845
C	4.6191	7.9000
D	7.1186	11.7903

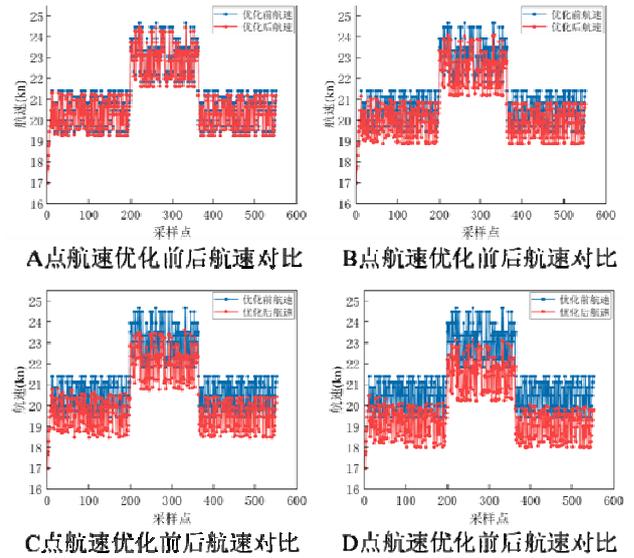


图 6 以油耗为目标的航速优化前后航速对比

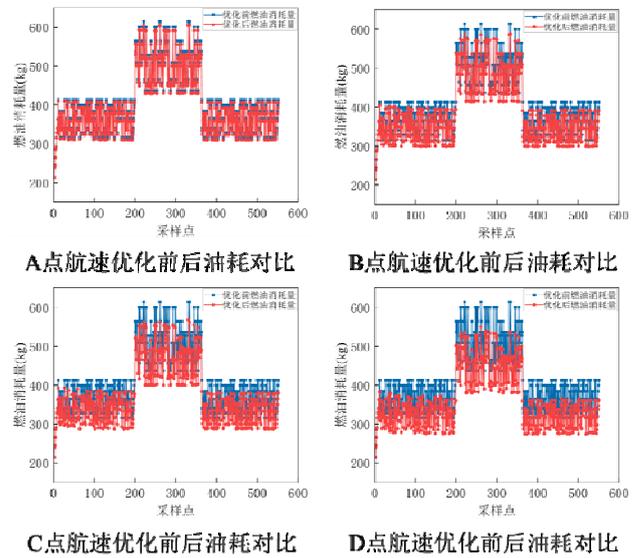


图 7 以油耗为目标的航速优化前后油耗对比

可以明显地观察到，船舶通过降低航速来达到节省燃油消耗量的目的。通过四张图对比，随着航速的不断降低，燃油消耗量不断降低。

3.2.2 以能效为目标的优化结果分析

将能效-航速模型代入到 SA-GA 求解算法中，通过限制航行时间，我们可以求得对应航行时间下的 EEOI，进而求得 EEOI 降低量和航行时间增加量的对应关系图，如图 8 所示。从图中我们可以观察到随着航行时间的增加，EEOI 不断降低。因此在实际航行的过程中，我们可以结合实际情况，在 EEOI 和航行时间之间进行权衡选择，依照船东意愿给出最佳航速建议。

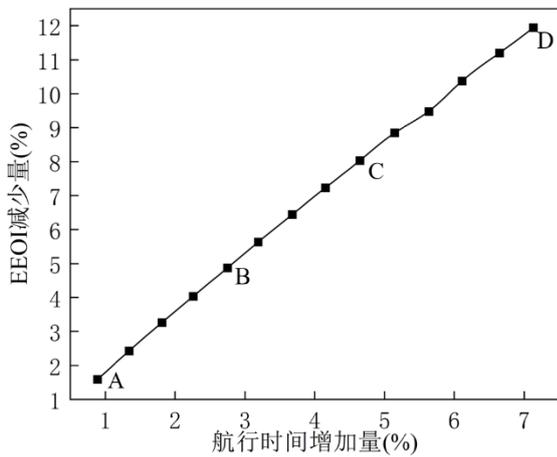


图 8 EEOI 降低量和航行时间增加量的对应关系图

本文中同样选取图 8 中 A、B、C 和 D 点四种情况下对 EEOI-时间进行对比分析, 每种情况下, 我们都可以得到对应的每一航段的转速, 进而可以求得每个航段上的 EEOI, 具体计算结果如表 8 所示。航速优化前后的航速对比如图 9 所示, EEOI 对比如图 10 所示。可以明显地观察到, 在航行的过程中, 通过降低航速来达到降低 EEOI 的目的。通过四张图对比, 随着航速的不断降低, EEOI 不断降低。

表 8 以能效为目标的航速优化计算结果

序号	航行时间增加量(%)	燃油消耗减少量(%)
A	0.8886	1.5947
B	2.7457	4.8736
C	4.6450	8.0369
D	7.1273	11.9468

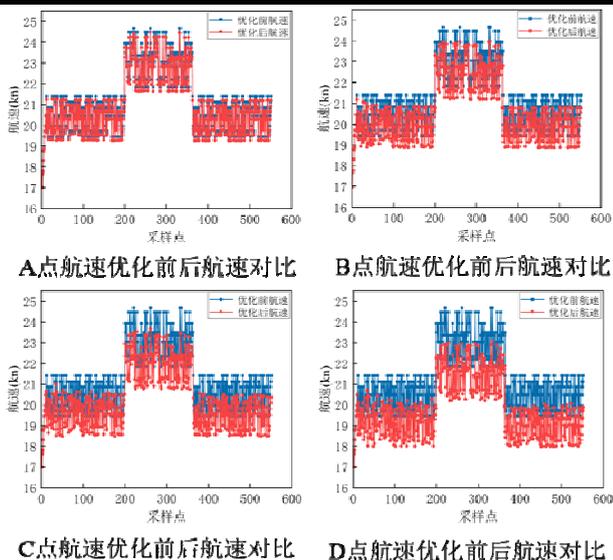


图 9 以能效为目标的航速优化前后航速对比

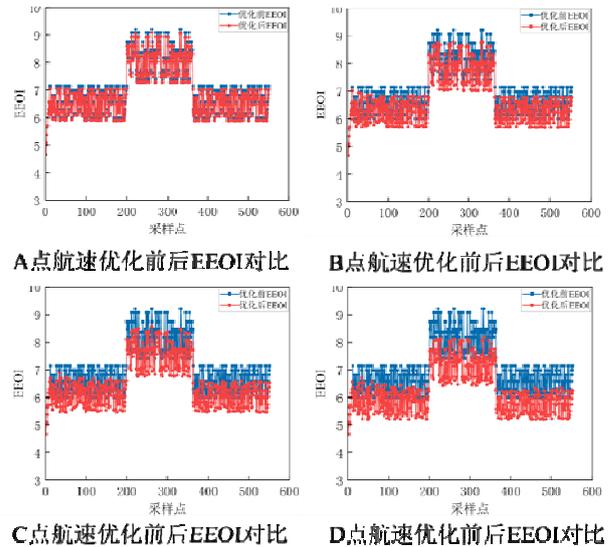


图 10 以能效为目标的航速优化前后 EEOI 对比

4 结论

本文基于船舶阻力模型、船舶动力系统模型, 推导了油耗-航速模型和能效-航速模型, 然后以油耗-航速模型和能效-航速模型为基础, 以航行时间-最低油耗、航行时间-最高能效多目标为优化目标函数, 提出 SA-GA 算法, 对船舶进行航速优化, 得到以下结果:

1、结合船舶功率实验数据模拟生成的船舶航行数据, 油耗总体误差为 0.0367%, 平均相对误差为 0.0302%, EEOI 总体误差为 0.0333%, 平均相对误差为 0.0409%。

2、根据油耗-航速模型和能效-航速模型, 分别使用 GA 算法和 SA-GA 算法优化计算, 增加相同航行时间, SA-GA 算法的优化结果明显优于 GA 算法。

3、优化结果显示在航行时间增加约 2.7%时, 燃油消耗量降低 4.78%, 能效营运指标 EEOI 降低 4.87%, 航行时间增加约 4.6%时, 燃油消耗量降低 8.03%, 能效营运指标 EEOI 降低 7.90%。

船东可以在油耗和时间、能效和时间多目标进行权衡选择, 既能做到降低油耗, 提高能效, 又能缩短航行时间的目的, 为船舶节能减排提供运维决策, 加快促进船舶行业向智能化方向发展转型。

参考文献:

- [1] CHANG C C, WANG C M. Evaluating the effects of speed reduce for shipping costs and CO2 emission [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2014.
- [2] PSARAFTIS H N, KONTOVAS C A. Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios [J]. Transportation

- Research Part C, 2014, 44(4): 52-69.
- [3] YAN X, WANG K, YUAN Y, et al. Energy-efficient shipping: An application of big data analysis for optimizing engine speed of inland ships considering multiple environmental factors [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 169: 457-68.
- [4] 陈前昆, 严新平, 尹奇志, et al. 基于 EEOI 的内河船舶航速优化研究 [J]. *交通信息与安全*, 2014, 32(4): 5.
CHEN Q K, YAN X P, YUN Z Q, et al. Speed Optimization for Inland River Ships Based on EEOI [J]. *Traffic Information and Safety*, 2014, 32(4): 5.
- [5] FAN A, YANG J, YANG L, et al. Joint optimisation for improving ship energy efficiency considering speed and trim control [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 113: 103527.
- [6] WEI Z, ZHAO L, ZHANG X, et al. Jointly optimizing ocean shipping routes and sailing speed while considering involuntary and voluntary speed loss [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110460.
- [7] HOLTROP J, MENNEN G G J. An approximate power prediction method [J]. *International Shipbuilding Progress*, 1982, 335(335): 166-70.
- [8] 林辉. 船舶智能能效管理系统设计研究 [D]; 武汉理工大学, 2019.
LIN H. Research on Design of Ship Intelligent Energy Efficiency [D]; Wuhan University of Technology, 2019.
- [9] 萧秋兰. 遗传模拟退火算法的优化研究 [J]. *信息记录材料*, 2022, 23(12): 95-8.
- [10] 黄连忠, 万晓跃, 孙永刚, et al. 基于模拟退火算法的船舶航速优化研究 [J]. *船舶*, 2018, 29(A01): 10.
HUANG L Z, WAN X Y, SUN Y G, et al. Research on ship speed optimization based on simulated annealing algorithm [J]. *Ship & Boat*, 2018, 29(A01): 10.
- [11] 刘书山, 刘兰兰, 肖乔莎, et al. 基于 GA-SA 算法的无人机巡检输电铁塔三维航迹优化 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(6): 2438-46.
LIU S S, LIU L L, XIAO Q S, et al. 3D Track Optimization of UAV (Unmanned Aerial Vehicles) Inspection of Transmission Tower Based on SA-GA [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(6): 2438-46.