

引用格式: 孙林, 陈辉, 管聪. 内河多工况船机桨匹配优化设计[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 187–195.
SUN L, CHEN H, GUAN C. Optimal design of ship-engine-propeller matching for inland ships under multiple operation conditions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(1): 187–195.

内河多工况船机桨匹配优化设计



扫码阅读全文

孙林^{1,2}, 陈辉^{*1,2}, 管聪^{1,2}

1 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063
2 武汉理工大学 高性能舰船技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430063

摘 要: [目的] 内河船舶在航行时存在顺水、逆水和急流等多种工况, 传统的内河船舶船-机-桨匹配设计方法仅对船舶在逆水上行时进行了匹配设计, 而在顺水下行工况, 因船舶推进效率低、主机利用率低, 造成油耗成本高、经济性较差等, 因此需进行多工况内河船舶船-机-桨匹配优化设计。[方法] 首先, 在不同工况下对内河船舶推进系统的各参数进行设计, 并将结果进行对比得出各设计参数对整体推进系统的影响; 然后, 对船舶推进系统的设计过程进行分析, 以航行成本和推进系统效率为目标函数, 以螺旋桨设计参数、主机功率、船舶上水航速和下水航速为变量, 建立数学模型; 最后, 应用 NSGA-II 算法进行多目标优化, 得到兼顾经济性和推进效率的船舶主机功率和推进系统设计参数。[结果] 结果显示, 使用所提方法得到的设计参数能够更好地适配内河的通航环境, 船舶的经济性更高。[结论] 研究成果可为内河船舶推进系统的选型与匹配优化提供设计工具, 从而为船舶的实际运行提供理论依据。
关键词: 船舶推进系统; 船-机-桨匹配; NSGA-II; 多目标优化
中图分类号: U664.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02282

Optimal design of ship-engine-propeller matching for inland ships under multiple operation conditions

SUN Lin^{1,2}, CHEN Hui^{*1,2}, GUAN Cong^{1,2}

1 School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China
2 Key Laboratory of High Performance Ship Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: [Objective] There are multiple operation conditions for ships navigation in inland river waterway, such as sailing downstream, upstream as well as in rapid stream, but the traditional ship-engine-propeller matching method can only ensure that the inland ships meet the design requirements when they travels upstream. Under downstream conditions, the ship propulsion's efficiency and energy utilization rate of main engine are both low, resulting in high fuel consumption and less cost-effectivness. To this end, the optimal design of ship-engine-propeller matching for the inland ships under multiple conditions is carried out. [Methods] First, the parameters of an inland ship's propulsion system under various conditions are designed, and the results are compared to ascertain the influence of each design parameter on the overall propulsion system. Then, the design process of the propulsion system is analyzed, and a mathematical model is established with navigation cost and propulsion system efficiency as the objective functions, and the design parameters of the propeller, main engine power and ship speeds (upstream & downstream) as variables. Finally, the main engine power and design parameters of propulsion system are determined balancing both economy and efficiency using the NSGA-II algorithm. [Results] The design parameters obtained using this method are easily adapted to the traffic environment of inland ships, making them more economical. [Conclusion] The results of this study can not only provide design tools for the selection of ship propulsion systems, but also provide a theoretical basis for its practical application.
Key words: ship propulsion system; ship-engine-propeller matching; NSGA-II; multi-objective optimization

收稿日期: 2021-01-26 修回日期: 2021-05-25 网络首发时间: 2022-02-22 17:06
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51909200); 绿色智能内河船舶创新专项资助(工业和信息化部[2019]358号)
作者简介: 孙林, 男, 1998年生, 硕士生。研究方向: 船舶动力系统设计与优化。E-mail: 1120795496@qq.com
陈辉, 男, 1962年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶动力系统建模、控制与智能化技术。
E-mail: hchen@whut.edu.cn
管聪, 男, 1987年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶动力系统建模、仿真与控制技术。
E-mail: guancong2008@126.com

*通信作者: 陈辉

0 引言

随着内河航运业的快速发展,以及船舶吨位和功率的不断增加,对内河船舶的船-机-桨匹配问题提出了更高要求。传统的内河船舶推进系统设计是依据逆水上行时的工况进行船-机-桨的匹配设计而得到各个参数,该方法只能保证柴油机在逆水上行时工作在设计工况点,而在顺水下行时会出现柴油机负荷率和螺旋桨效率低及燃油消耗高等问题,从而导致航行成本过高。因此,在充分考虑内河航行工况的基础上对船舶推进系统进行设计,对降低内河船舶航行成本和提高推进系统效率具有重要意义。

目前,在船-机-桨匹配设计领域,已开展了一系列研究。Esmailian 等^[1]在考虑全寿期燃油消耗(LFC)和成本这 2 个目标函数的基础上,基于 NSGA-II 算法对螺旋桨几何参数、船体参数及螺旋桨叶片应力进行了优化,给出了采用 B 系列螺旋桨的计算结果,结果显示采用该方法能使 2 个目标函数显著最小化。覃峰等^[2]将遗传算法引入机-桨匹配优化设计中,建立了以推进系统总效率为目标函数的优化模型,针对传统的船-机-桨匹配方法,较好地改善了计算规模和优化结果。Ren 等^[3]研究并论证了能效设计指标(energy efficiency design index, EEDI)对船-机-桨匹配设计的影响,其通过改变系统匹配参数,如航速、有效功率和螺旋桨直径,观察了 EEDI 的变化趋势与程度,开发了供船舶推进系统匹配设计和 EEDI 计算的程序,为 EEDI 规则下的船舶、主机和螺旋桨设计提供了参考。马永杰^[4]针对船舶的

实际运行情况,建立了基于动力推进系统船-机-桨匹配的实时动态数学模型,并在船-机-桨匹配实时动态模型的基础上编写了船-机-桨匹配仿真软件,通过该软件,可以模拟船舶的启动、加速、减速、倒车等多种工况。

在船-机-桨匹配设计领域,目前的研究主要是依据传统的机-桨匹配方法进行设计,还没有专门针对内河船舶的设计方法。为此,本文将以航行于武汉—上海的 7 500 t 散货船和 B 系列五叶螺旋桨为例对其推进系统进行设计和分析。首先,分析长江中下游的通航环境,使用传统的方法对不同工况下内河船舶的各参数进行设计,比较得到各参数对整体推进系统的影响;然后,对内河船舶的船-机-桨匹配过程进行建模;最后,以航行成本和推进系统效率为目标函数,以螺旋桨的各设计参数、主机功率等为变量,应用 NSGA-II 算法进行多目标优化,得到满足要求的船舶推进系统设计参数。

1 船-机-桨匹配

1.1 船-机-桨匹配设计参数

船舶在航行过程中,船体、主机和螺旋桨一起组成一个统一的整体。主机燃烧燃料产生的能量通过轴系传递给螺旋桨,螺旋桨产生推力确保船舶可以按照设定的航速运行,这三者之间相互匹配,以确保船舶推进系统能量传递的平衡和稳定变化。在船舶推进系统中,船体、主机和螺旋桨各设计参数之间的关系如图 1 所示。图中: V_s 为船舶航速; R 为船舶阻力; P_E 为有效功率;

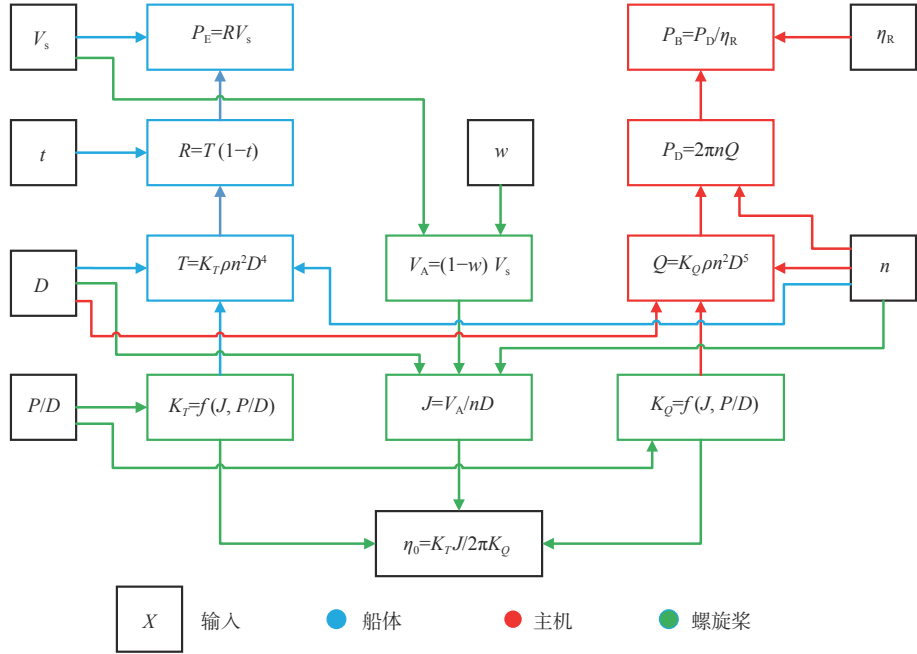


图 1 船-机-桨匹配框图

Fig. 1 Framework of ship-engine-propeller matching

t 为推力减额系数; D 为螺旋桨直径; T 为螺旋桨有效推力; ρ 为水的密度; n 为螺旋桨转速; P/D 为螺旋桨螺距比; w 为伴流系数; V_A 为螺旋桨进速; J 为进速系数; P_B 为轴功率; P_D 为螺旋桨收到的功率; η_R 为相对旋转效率; Q 为螺旋桨的扭矩; K_T 为推力系数, K_Q 为扭矩系数, $K_T=f(J, P/D)$, $K_Q=f(J, P/D)$, 其中 f 表示 K_T, K_Q 是关于 $J, P/D$ 的函数式; η_0 为敞水效率。

1.2 传统的船-机-桨匹配方法

传统的船-机-桨匹配分为船舶-主机匹配与主机-螺旋桨匹配 2 个阶段^[5-8]。

1) 已知设计航速和有效功率曲线(图 2), 依据初步拟定的螺旋桨直径 D , 计算得出螺旋桨的最佳转速 n 、敞水效率 η_0 、螺距比 P/D 和主机功率 P_s

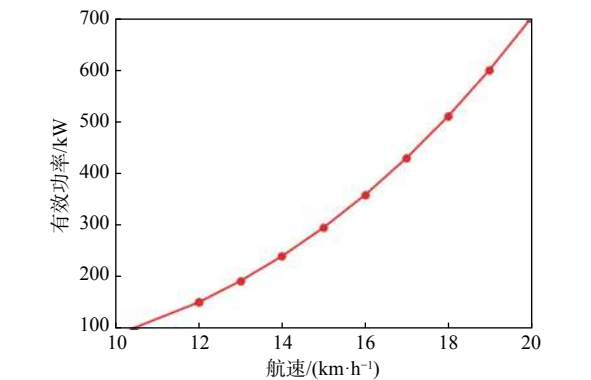


图 2 有效功率曲线图
Fig. 2 Curve of effective power

2) 由在第 1 阶段计算得到的螺旋桨所需主机输出功率, 根据柴油机的减额输出特性、船舶实际运行工况以及经济性等, 基于第 1 阶段所求的螺旋桨设计工况点(图 3, 图中 K_{T_ship} 为船舶推力系数, 曲线 K_{T_ship} 与 K_T 的交点即为螺旋桨设计工况点)确定主机的设计工况点, 即主机的额定功率以及额定转速。

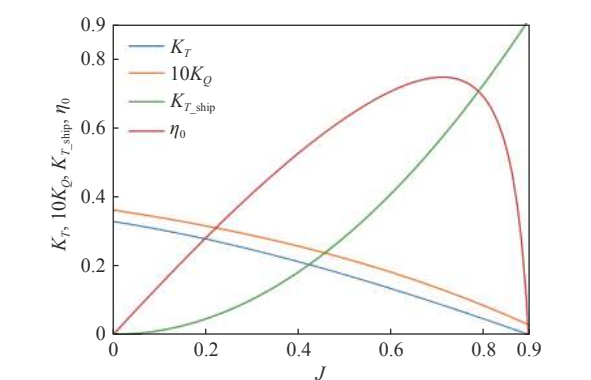


图 3 螺旋桨敞水特性曲线示意图
Fig. 3 Curves of the propeller open water efficiency

经过船舶-主机匹配得到主机额定功率和转速之后, 需要进行主机-螺旋桨匹配设计, 即设计一个能与主机良好配合工作的螺旋桨, 以使螺旋桨的效率达到最高, 同时保证船舶达到设计航速的要求。具体流程为: 已知主机功率 P_s 、转速 n 及船舶有效功率曲线, 确定该主机所匹配的螺旋桨直径 D , 螺距比 P/D 以及所能达到的最大航速 V_{max} 。

2 内河工况对船舶推进系统设计的影响

2.1 内河工况分析

长江航道的主要航线是宜宾—上海。其中, 宜宾—宜昌为上游, 宜昌—武汉为中游, 武汉—上海为下游。图 4 所示为长江航道图。

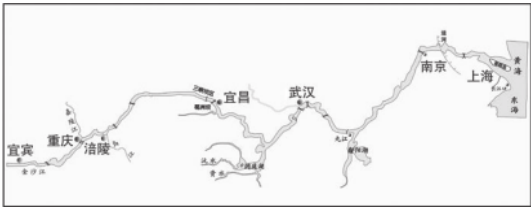


图 4 长江航道图
Fig. 4 Inland waterway chart of Yangtze river

长江航道各区域的水流速度如表 1 所示。

表 1 长江航道水流速度及里程		
Table 1 Water flow rate and range of Yangtze waterway		
航区	水流速度/(km·h ⁻¹)	里程/km
上游(宜宾—宜昌)	8~5	648
中游(宜昌—武汉)	5~4	626
下游(武汉—上海)	4~1	1 125

2.2 影响因素

本文以航行于武汉—上海的 7 500 t 散货船和 B 系列五叶螺旋桨为例进行分析。分别在 0, 1, 2, 3, 4, 5 km/h 的水流速度和调整螺旋桨设计直径的情况下, 使用传统方法对其进行船-机-桨匹配设计, 得到主机额定功率、螺旋桨设计直径和水流速度 $V_{水}$ (工况)三者间的关系, 以及得到敞水效率、螺旋桨设计直径和水流速度 $V_{水}$ (工况)三者间的关系, 分别如图 5 和图 6 所示。

以设计航速为 18 km/h, 螺旋桨直径为 2.2 m 的输入对 7 500 t 散货船进行设计, 得到船舶逆水上行和顺水下行时的功率需求与敞水效率对比分别如图 7、图 8 所示。

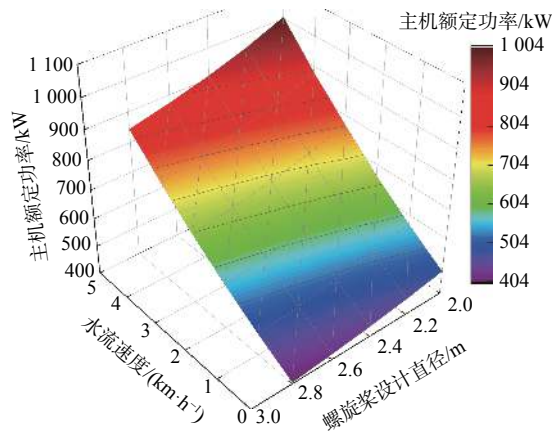


图 5 主机额定功率、螺旋桨设计直径和
水流速度三者间关系
Fig. 5 Relationship between rated power of main engine, propeller design diameter and water flow speed

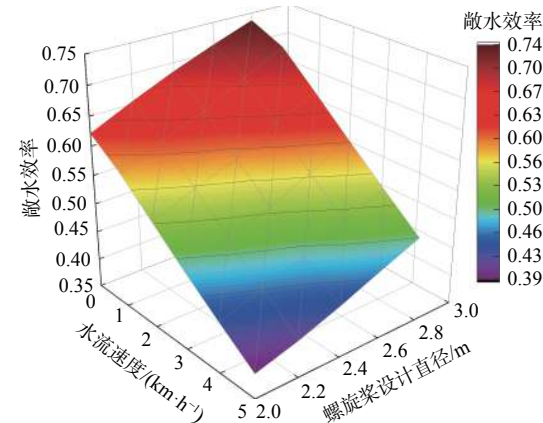


图 6 敞水效率、螺旋桨设计直径和
水流速度三者间关系
Fig. 6 Relationship between open water efficiency, propeller design diameter and water flow speed

在不同的水流速度(0, 1, 2, 3, 4, 5 km/h)下,相应增加螺旋桨的设计直径(分别取 2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.7, 2.8 m)进行分析,得到船舶逆水上行和顺水下行时的功率需求与敞水效率对比分别如图 9、图 10 所示。

对比图 7 与图 9,发现在螺旋桨直径变化的情况下,主机需求的功率和额定功率比螺旋桨直径

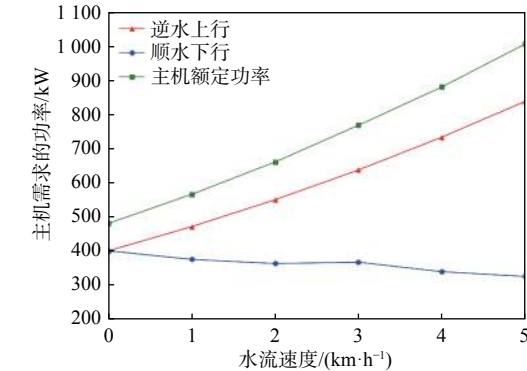


图 7 螺旋桨直径不变时的功率需求图
Fig. 7 Power demand diagram of propeller when the diameter of propeller is constant

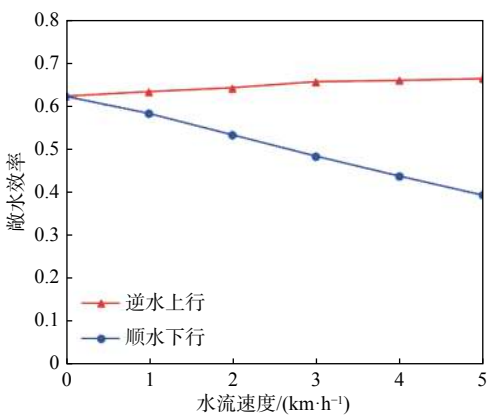


图 8 螺旋桨直径不变时的效率对比图
Fig. 8 Efficiency comparison diagram when the diameter of propeller is constant

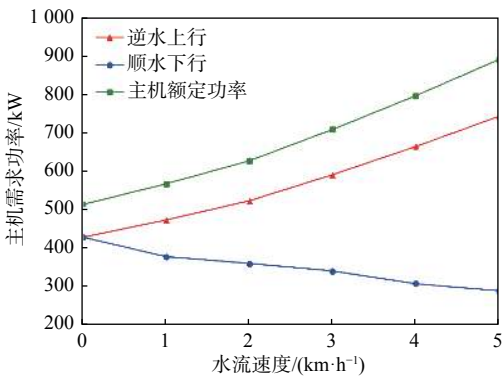


图 9 螺旋桨直径变化时的功率需求图
Fig. 9 Power demand diagram of propeller when the diameter of propeller is changed

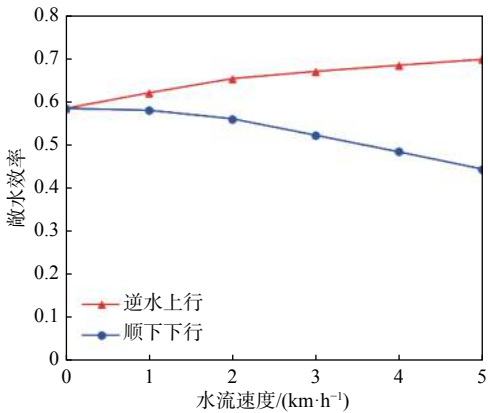


图 10 螺旋桨直径变化时的效率对比图
Fig. 10 Efficiency comparison diagram of propeller when the diameter of propeller is changed

不变情况下的要低。对比图 8 与图 10,发现在逆水上行时,随着水流速度的增加,螺旋桨直径变化情况下螺旋桨敞水效率的增长速度比螺旋桨直径不变情况下的更快;在顺水下行时,随着水流速度的增加,螺旋桨直径变化情况下螺旋桨敞水效率的降低速度比螺旋桨直径不变情况下的更缓慢,其效率更高。由以上分析结果可知,若依据传统的方法对内河船舶进行船-机-桨匹配设计,

得到的设计参数无法很好地适配内河的各种工况。综上所述,水流速度(工况)对内河船舶推进系统设计的影响较大,在内河多工况情况下,采用传统方法设计出的参数所达到的效果并不理想。因此在内河船舶船-机-桨匹配设计中,应该考虑水流速度的影响,并将螺旋桨直径和航速作为设计变量进行设计。

3 多目标优化问题建模

3.1 内河船舶船-机-桨匹配问题分析

传统方法通常是以推进系统的效率为目标,而忽视了不同运行工况差异所带来的经济性和燃油消耗等方面的问题。针对内河船舶推进系统的设计,应充分考虑内河的多工况问题,所设计出来的主机功率、螺旋桨直径和其他设计参数应使船舶在全工况运行周期内推进系统的效率和成本均处于最优值。上节在多种工况下,使用传统的船-机-桨匹配设计方法对内河船舶进行了船-机-桨匹配计算,得出应将螺旋桨直径和设计航速作为设计变量进行匹配计算,而非作为设计输入的结论。因此,本节将把内河船舶逆水上行和顺水下行时的设计航速与螺旋桨直径作为设计变量,在 Python 语言环境下使用 Geatpy 库建立内河船舶船-机-桨匹配多目标优化模型,其框架图如图 11 所示。

3.2 设计变量

对于内河船舶推进系统的设计,应考虑水流速度对船舶逆水上行和顺水下行运行工况的影响。传统方法将航速和螺旋桨直径作为设计输入,只能满足船舶在逆水上行时的要求,而在顺水下行时会出现柴油机利用率不足、燃油消耗高和推进系统效率低等问题。因此,本文将以螺旋桨螺距比 P/D 、盘面比 A_E/A_O 、船舶逆水上行和顺水下行时的螺旋桨转速 n_1, n_2 、螺旋桨直径 D 、船

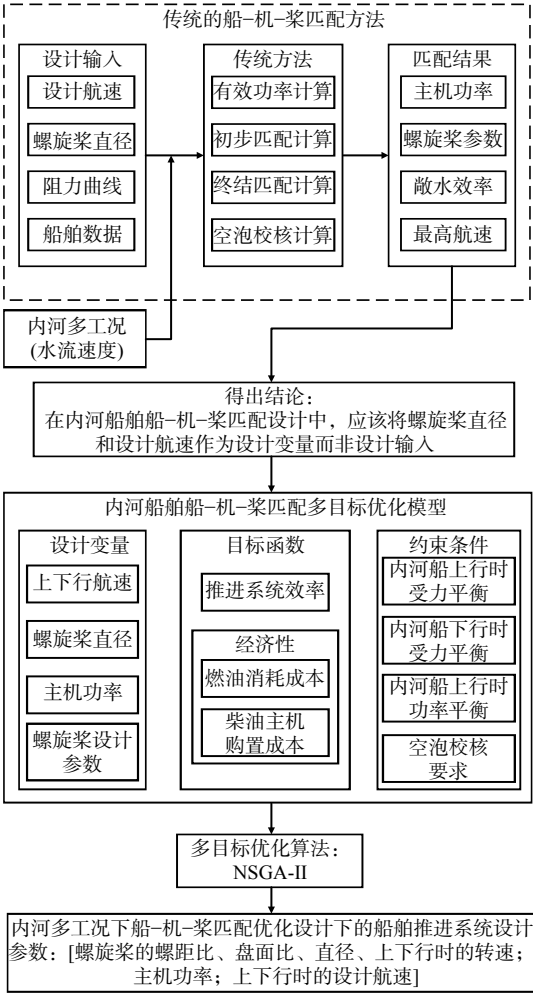


图 11 内河多工况下船-机-桨匹配优化设计框图

Fig. 11 Framework of optimization design for ship-engine-propeller matching under multiple conditions in inland water

舶逆水上行和顺水下行时的设计航速 V_1, V_2 , 以及主机输出功率 P_s 为设计变量 X 。

$$X=[P/D, A_E/A_O, n_1, n_2, D, V_1, V_2, P_s]$$

3.3 目标函数

3.3.1 推进系统效率

船体、主机和螺旋桨形成一个能量平衡系统^[9],其中主机为能量源,能量在三者之间传递,如图 12 所示。

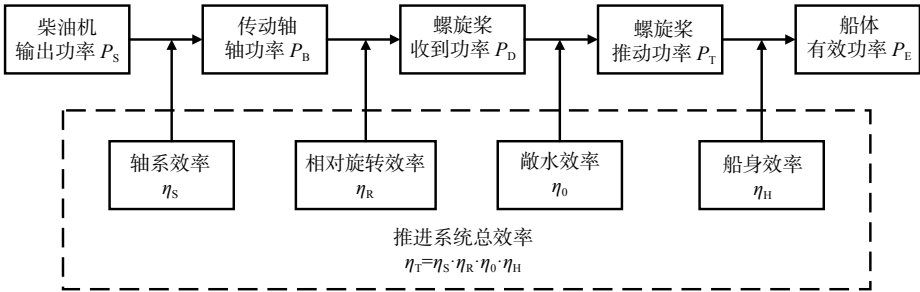


图 12 船舶推进系统功率传递示意图

Fig. 12 Schematic diagram of power transfer of ship propulsion system

船舶推进系统总效率 η_T [10] 由下式求得:

$$\eta_T = \eta_S \cdot \eta_R \cdot \eta_0 \cdot \eta_H \quad (1)$$

其中, 轴系效率 η_S 一般取值 0.96~0.995, 相对旋转效率 η_R 一般取值 0.98~1.07。船身效率 η_H 由下式得到:

$$\eta_H = \frac{(1-t)}{(1-w)} \quad (2)$$

螺旋桨的敞水效率 η_0 可由下式求得:

$$\eta_0 = \frac{K_T \cdot J}{K_Q \cdot 2\pi} \quad (3)$$

对于 B 系列螺旋桨, J , K_T , K_Q 可由下列回归公式 [11] 计算得到:

$$J = \frac{V_s(1-t)}{n \cdot D} \quad (4)$$

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n(J)^{s_n} \left(\frac{P}{D}\right)^{t_n} \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^{u_n} (Z)^{v_n} \quad (5)$$

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n(J)^{s_n} \left(\frac{P}{D}\right)^{t_n} \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^{u_n} (Z)^{v_n} \quad (6)$$

式中: V_s 为船舶航速, m/s; C_n , s_n , t_n , u_n , v_n 为 B 系列螺旋桨 K_T , K_Q 多项式的各项系数; Z 为桨叶数。

3.3.2 经济性

1) 燃油消耗成本。

对于内河船舶, 以一个上、下行周期内的燃油消耗量与轻油价格的乘积作为其燃油消耗成本。

对于柴油机, 其燃油消耗率 (SFOC) 是关于柴油机使用率的函数, 如图 13 所示。燃油消耗率 g 可由下式求得:

$$g = f\left(\frac{P_{\text{需求}}}{P_s}\right) \quad (7)$$

式中, $P_{\text{需求}}$ 为船舶在运行过程中对主机功率的需求。

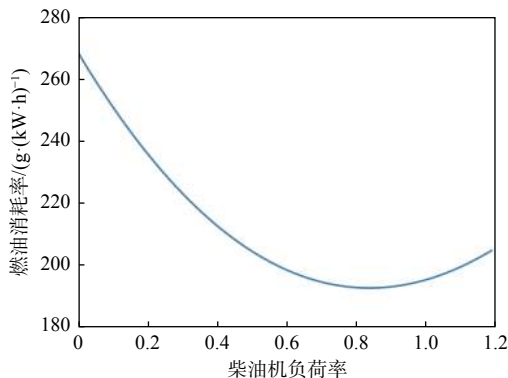


图 13 燃油消耗率与柴油机负荷率之间的函数关系

Fig. 13 Functional relationship of SFOC-diesel load percentage

轻油的价格为 0.5 万元/t, 则燃油的消耗成本 y_1 可由下式求得:

$$y_1 = \left(f\left(\frac{P_{\text{下行}}}{P_s}\right) \cdot \frac{P_{\text{下行}}}{P_s} \cdot P_{\text{下行}} \cdot \frac{L}{V_1} + f\left(\frac{P_{\text{上行}}}{P_s}\right) \cdot \frac{P_{\text{上行}}}{P_s} \cdot P_{\text{上行}} \cdot \frac{L}{V_2} \right) \times 10^{-6} \times 0.5 \times 2 \quad (8)$$

式中: $P_{\text{上行}}$, $P_{\text{下行}}$ 分别为船舶在逆水上行和顺水下行工况运行时的主机功率需求; L 为航程。

2) 柴油机购置成本。

内河船用柴油机的价格一般为 0.6 万元/kW, 则柴油主机的购置成本 y_2 可由下式求得:

$$y_2 = 0.6 \cdot P_s \cdot 2 \quad (9)$$

3.4 约束条件

根据船舶推进系统的运动学关系 [12] (螺旋桨产生的推力与船舶阻力平衡) 及能量守恒 (螺旋桨负载与柴油机输出功率平衡), 可以得到 3 个约束条件:

$$\begin{cases} T_1(1-t) = R_{\text{上行}} \\ T_2(1-t) = R_{\text{下行}} \\ 2\pi n_1 Q_1 = P_s \cdot \eta_S \cdot \eta_R \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$R_{\text{上行}} = C \cdot (V_1 + V_{\text{水}})^2 \quad (11)$$

$$R_{\text{下行}} = C \cdot (V_2 - V_{\text{水}})^2 \quad (12)$$

$$T_1 = K_{T1} \cdot \rho \cdot n_1^2 \cdot D^4 \quad (13)$$

$$T_2 = K_{T2} \cdot \rho \cdot n_2^2 \cdot D^4 \quad (14)$$

$$Q_1 = K_Q \cdot \rho \cdot n_1^3 \cdot D^5 \quad (15)$$

以上式中: T_1 , T_2 分别为船舶上行和下行时螺旋桨产生的推力; $R_{\text{上行}}$, $R_{\text{下行}}$ 分别为船舶上行和下行时的船舶阻力; Q_1 为船舶上行时螺旋桨产生的扭矩; C 为船舶阻力系数。

因螺旋桨需要满足空泡要求, 因此还需要在算法中添加有关盘面比空泡校核的约束条件, 从而保证所设计螺旋桨的盘面比满足空泡校核要求, 即螺旋桨盘面比大于不发生空泡所要求的最小盘面比。空泡校核的经验公式采用 keller 公式 [13]。则第 4 个约束条件如下所示:

$$\frac{A_E}{A_O} \geq \frac{(1.3 + 0.3Z)T}{(P_0 - P_v)} + K \quad (16)$$

式中: P_0 为螺旋桨轴中心的静压力; P_v 为水的汽化压力; K 为系数 (单桨船为 0.2, 高速双桨船为 0, 其他种类的双桨船为 0.1)。

3.5 多目标优化模型

考虑内河船舶的经济性 (一个周期的燃油消

耗成本和船舶主机购置成本)和推进系统效率的
多目标优化模型定义如下:

min

$f(X) = [-\eta_T, y_1 + y_2]$

(17)

s.t.

$$\begin{cases} 0.1 \leq P/D \leq 1.2 \\ 0.1 \leq A_E/A_O \leq 1 \\ n_{1min} \leq n_1 \leq n_{1max} \\ n_{2min} \leq n_2 \leq n_{2max} \\ D_{min} \leq D \leq D_{max} \\ V_{1min} \leq V_1 \leq V_{1max} \\ V_{2min} \leq V_2 \leq V_{2max} \\ 0 \leq P \leq P_{max} \end{cases}$$

(18)

3.6 多目标优化算法

由于各个优化目标之间的相互竞争和冲突关系, 多目标优化的解并不唯一的, 而是一组均衡解, 即最优非劣解或 Pareto 最优解集^[14]。NSGA-II 算法是目前最流行的多目标遗传算法之一, 该算法能降低非劣排序遗传算法的复杂性, 具有运行速度快、解集的收敛性好等优点。因此, 本文应用 NSGA-II 算法求解式 (18) 中的多目标 Pareto 解。其流程如图 14 所示。图中, *Gen* 为进化代数, *R_t* 为父代、子代合并后的种群, *P_{t+1}* 为新的父代种群, *N_p* 为种群中支配个体 *p* 的个体数。

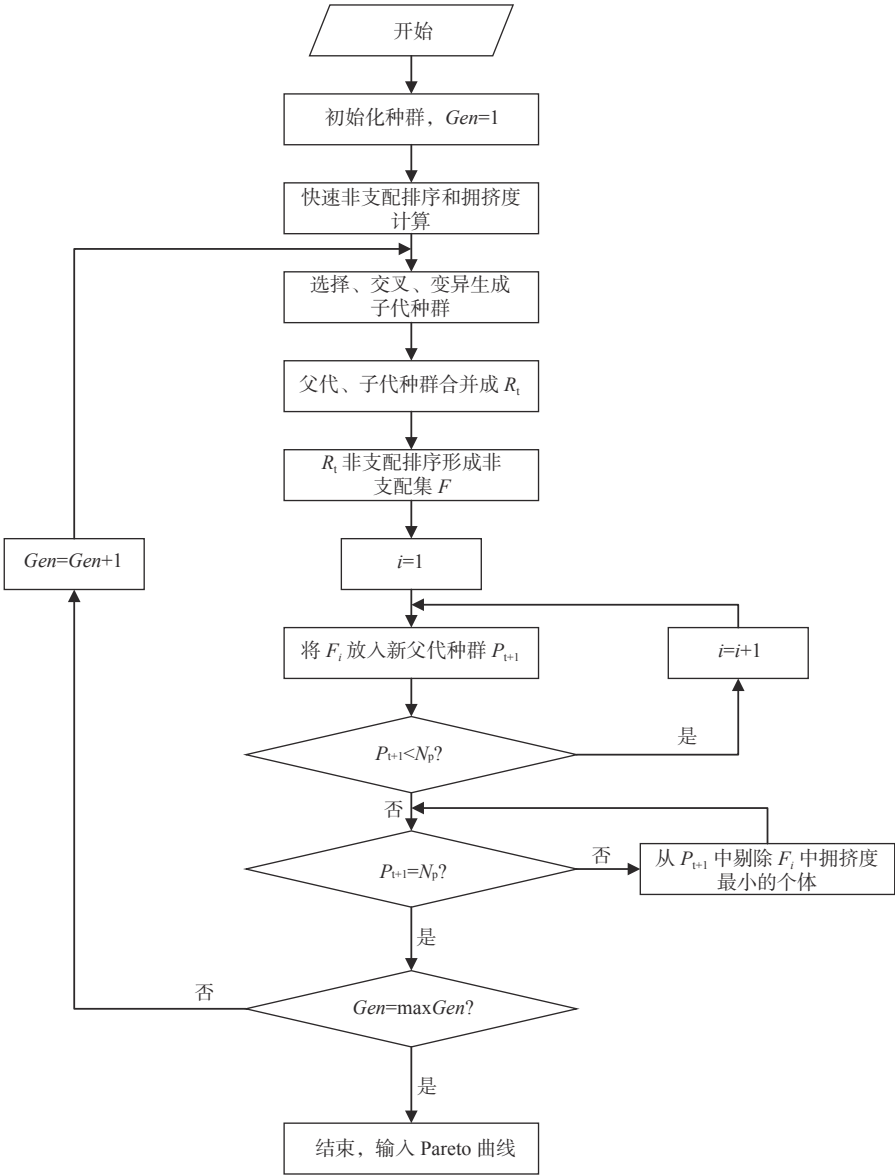


图 14 NSGA-II 算法流程图
Fig. 14 NSGA-II algorithm flow chart

4 算例分析

本文将以航行于武汉—上海之间的 7 500 t 散货船为例, 采用 B 系列五叶螺旋桨对其进行设

计。NSGA-II 算法参数设置如表 2 所示。
在通过 python 语言建立的内河多工况下船-机-桨匹配多目标优化模型中, 调用 Geatpy 库中的 NSGA-II 算法包, 设置 NSGA-II 算法参数, 进行

表 2 NSGA-II 算法参数
Table 2 Parameters of NSGA-II algorithm

参数	数值
最大遗传代数	800
种群规模	500
突变率	0.3
变异类型	Random
重组率	0.7

多目标优化。共进行了 5 次实验,优化结果如表 3 所示(表中, f_2 为柴油机购置成本, f_1 为燃油消耗成本)。由表可以看出,只有第 5 次实验的优化效果不太理想,其中只推进系统的效率有明显提高,经济性目标函数中 2 个指标的优化效果均不

明显,其结果不符合多目标优化原则,应予以舍弃;第 1, 2, 4 次实验的优化结果较为理想,2 个目标函数(推进系统总效率和经济性)相比原始值均有较大提高;第 3 次实验结果中柴油主机购置费用 f_1 的优化不太明显,但其他目标函数,如推进系统效率和燃油消耗成本的优化效果均较好,尤其是燃油消耗成本,降低的幅度较大。因此,可以考虑采用第 3 次实验结果。5 次的优化结果表明,NSGA- II 算法是一种有效的解决多目标优化问题的方法,能够快速找出 Pareto 前沿解。内河多工况下的船-机-桨匹配优化设计方法能够较为稳定地解决内河船舶在多工况下的推进系统设计问题。

表 3 原始值与优化结果的对比 (Pareto 前沿解)
Table 3 Comparison of initial values and optimal solutions (Pareto front)

参数	原始值	优化结果				
		第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
P/D	0.66	0.68	0.64	0.84	0.87	0.40
A_p/A_0	0.45	0.49	0.76	0.85	0.70	0.55
$n_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	315.84	321.6	260.4	280.7	350.4	250.8
$n_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	315.84	215.6	172.2	204.6	220.6	167.2
D/m	2.0	1.85	2.18	2.39	2.14	2.75
$V_1/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	18	15.72	16.3	16.7	15.78	16.15
$V_2/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	16	12.29	10.30	13.6	14.3	13.0
P_s/kW	604.91	517.41	515.79	581.61	550.48	586.95
η_r	0.58	0.62	0.6	0.62	0.60	0.66
$f_1/\text{万元}$	5.83	4.94	4.77	5.08	5.48	5.63
$f_2/\text{万元}$	725.89	620.9	618.94	697.8	660.58	704.34

以第 2 次优化结果为例,在经济性目标函数中,燃油消耗成本 f_1 降低了 18.1%,柴油机的购置成本 f_2 降低了 14.73%,船舶推进系统效率提高了 0.6。初始方案与优化方案的敞水特性曲线如图 15 所示。

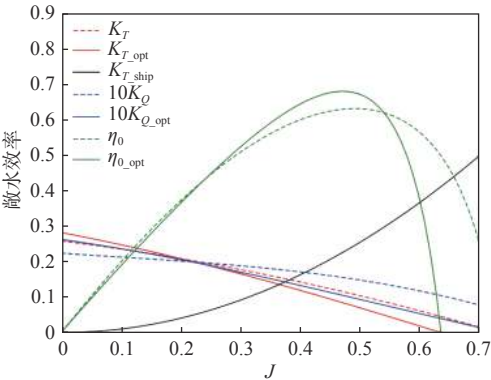


图 15 初始方案与优化方案的敞水特性曲线
Fig. 15 The open water performance curves of the initial and optimization scheme

5 结 语

本文提出了一种基于 NSGA- II 算法、考虑内河多工况的船-机-桨匹配设计方法。优化的目标函数有 2 个: 一个是船舶推进系统的总效率, 另一个是经济性(燃油消耗成本和主机购置成本)。文章首先对船-机-桨匹配设计理论进行分析, 得出了船体、主机和螺旋桨各设计参数之间的相互影响关系; 然后使用传统的船-机-桨匹配设计方法, 在不同工况下对内河船舶的推进系统进行了设计, 随后又对内河船的机-桨匹配问题进行建模, 得到了需要求解的数学模型; 最后, 设置 NSGA- II 算法参数, 以内河 7 500 t 散货船为例进行了多目标优化。基于多次优化结果, 得到以下主要结论:

- 1) 本文研究的内河多工况船-机-桨匹配优

化设计方法充分考虑了内河船上、下行工况对船-机-桨匹配的影响, 其以推进系统的总效率和经济性为目标函数, 进行了多目标优化设计, 结果显示采用本文方法得到的优化设计参数(主机功率、螺旋桨螺距比、螺旋桨盘面比、螺旋桨直径、船舶上下水航速)能够更好地适配内河的通航环境, 可提高船舶运营的经济性。

2) 内河多工况船-机-桨匹配优化设计方法能适配内河船舶推进系统的多目标优化问题, 可为内河船舶的船-机-桨选型、匹配优化设计和实际系统优化运行提供理论方法与技术支撑。

参考文献:

[1] ESMAILIAN E, GHASSEMI H, ZAKERDOOST H. Systematic probabilistic design methodology for simultaneously optimizing the ship hull-propeller system[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2017, 9(3): 246–255.

[2] 覃峰, 詹志刚, 杨波, 等. 基于遗传算法的船舶推进系统船、机、桨匹配优化设计 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(1): 50–52.

QIN F, ZHAN Z G, YANG B, et al. Genetic algorithm-based optimization design for match of ship, engine and propeller[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2003, 27(1): 50–52 (in Chinese).

[3] REN H L, DING Y, SUI C B. Influence of EEDI (energy efficiency design index) on ship-engine-propeller matching[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(12): 425.

[4] 马永杰. 船机桨匹配及数值仿真 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

MA Y J. The matching of ship, engine and propeller and numerical simulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011 (in Chinese).

[5] 胡义, 刘宗发. 基于 CFD 技术的机桨匹配初步设计 [J]. 中国航海, 2018, 41(1): 38–42.

HU Y, LIU Z F. Preliminary design of engine-propeller matching based on CFD technology[J]. *Navigation of China*, 2018, 41(1): 38–42 (in Chinese).

[6] 纪宏志, 邵钢, 徐巍, 等. 柴-燃联合动力装置“船-机-桨”匹配特性 [J]. 船舶工程, 2019, 41(8): 42–46, 133.

Ji H Z, SHAO G, XU W, et al. Matching characteristics of "ship-engine-propeller" of CODAG[J]. *Ship Engineering*, 2019, 41(8): 42–46, 133 (in Chinese).

[7] 杨琨, 舒佳成, 胡彪. 基于互联网的船舶机桨匹配远程计算平台 [J]. 中国航海, 2017, 40(2): 25–28.

YANG K, SHU J C, HU B. Internet-based remote calculation platform for diesel engine-propeller matching[J]. *Navigation of China*, 2017, 40(2): 25–28 (in Chinese).

[8] 秦志杰, 阮初忠. 吊舱式电力推进船舶螺旋桨匹配设计仿真研究 [J]. 中国舰船研究, 2014, 9(6): 65–72.

QIN Y Z, RUAN R Z. The simulation research of matching design of propellers to POD propulsion ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2014, 9(6): 65–72 (in Chinese).

[9] 王建政. 船机桨匹配设计软件开发 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

WANG J Z. Software development for matching design of ship engine and propeller[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012 (in Chinese).

[10] 曹梅亮. 切割桨叶随边以适应船-机-桨的匹配 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(1): 148–151.

CAO M L. Trailing edge incision to improve the match between power and revolutions[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2000, 34(1): 148–151 (in Chinese).

[11] 刘海强, 吕林. 船舶机桨匹配设计与分析计算平台研究 [J]. 船海工程, 2008, 37(3): 56–58.

LIU H Q, LV L. Research on calculation platform for matching design of screw propeller and diesel engine[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2008, 37(3): 56–58 (in Chinese).

[12] XIE G M. Optimal preliminary propeller design based on multi-objective optimization approach[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 16: 278–283.

[13] 王宸. 船舶非设计工况的机桨匹配研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

WANG C. Research on ship-engine-propeller matching under off-design conditions[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019 (in Chinese).

[14] 梁赞通. 调距桨推进装置机桨优化匹配研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2019.

LIANG Z T. The optimal matching of the engine-propeller for controllable pitch propeller ship[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2019 (in Chinese).