

耙吸挖泥船导管桨两工况的设计优化

吴海燕^{a,b}, 余龙^{a,b*}

(上海交通大学, a. 海洋工程国家重点实验室; b. 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: [目的]为优化耙吸挖泥船在低速作业与自由航行 2 种典型工况的推进效率, [方法]以耙吸挖泥船导管桨为研究对象, 基于图谱法分别设计导管定距桨和导管调距桨, 并比较二者的性能差异; 构建多目标优化平台, 结合 RANS 方法与 NSGA-II 算法, 开展兼顾这 2 种工况的导管定距桨优化研究。[结果]结果表明, 基于图谱设计所得导管桨在 2 种工况下的螺距比相近, 因此导管定距桨能在 2 种工况下均表现出较好的效率。经优化后得到的 2 个最佳导管定距桨方案, 在挖泥工况下效率分别提升 5.65% 和 5.59%, 在自由航行工况下效率分别提高 7.70% 和 8.09%。[结论]研究结果可为后续相关优化工作提供参考。

关键词: 耙吸挖泥船 (TSHD); 导管桨; 图谱设计; RANS 方法; 多目标优化

中图分类号: U664.33 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.03.08

Design and Optimization of Ducted Propellers for Two Operating Conditions of the Trailing Hopper Suction Dredger

WU Haiyan^{a,b}, YU Long^{a,b*}

(Shanghai Jiao Tong University, a. State Key Laboratory of Ocean Engineering; b. School of Ocean and Civil Engineering (OCE), Shanghai 200240, China)

Abstract: [Purpose] To optimize the propulsion efficiency of trailing suction hopper dredgers (TSHD) in two typical operating conditions: low-speed operation and self high-speed navigation, [Method] The ducted pitch propeller and the ducted pitch propeller are designed based on the graph method, and the performance difference of the two cases is compared. A multi-objective optimization platform is established, utilizing the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) method and the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) to conduct an optimization study of the fixed-pitch ducted propeller that balances both operating conditions. [Result] The results show that the pitch ratios of the ducted propellers obtained based on the graph method are very close for both operating conditions, allowing a compromise propeller design to achieve good efficiency in both conditions. Furthermore, compared to the ducted fixed-pitch propeller, the ducted controllable-pitch propeller has higher requirements for the disk area ratio, and under dredging conditions, the fixed-pitch propeller exhibits higher efficiency. Through optimization, the two optimal ducted propeller designs obtained show efficiency improvements of 5.65% and 5.59% under dredging condition, and increases of 7.70% and 8.09% under high-speed navigation condition, respectively. [Conclusion] It provides assistance and reference for subsequent research.

Key words: trailing suction hopper dredgers (TSHD); ducted propeller; graph design; reynolds-averaged navier-stokes (RANS) method; multi-objective optimization

收稿日期: 2025-05-21; 修回日期: 2025-09-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介: 吴海燕 (2000—), 女, 硕士研究生。研究方向: 螺旋桨水动力数值模拟与优化设计。

通信作者: 余龙 (1976—), 男, 博士、副教授。研究方向: 船舶绿色推进装置开发、智能设计方法。

E-mail: yulone@sjtu.edu.cn

0 引言

“双碳”背景下, 节能减排与绿色低碳已成为船舶行业关注的焦点, 型线优化和节能附体等多种技术得到了快速发展和应用。尤其是推进器的设计优化, 其通过减少推进损失来提高船舶整体能效这一重要技术手段受到了广泛关注。

耙吸挖泥船作为具备自航能力的疏浚船舶, 与常规船舶不同, 具有典型的低速作业工况和自由航工况。由于2种工况对推进器的性能需求存在差异, 从降低推进损失的角度出发, 针对这2工况开展耙吸挖泥船的推进器优化研究十分必要。

目前, 螺旋桨优化领域已积累了一定的研究成果。针对B系列螺旋桨, BENINI^[1]采用遗传算法在空泡限制条件下实现了敞水效率的最大化; 针对Ka+JD25型导管桨, 贾小俊^[2]结合惩罚函数法与单纯形法完成了以效率为目标的优化; 针对半浸桨, 曾志波等^[3]先利用反向传播(Back Propagation, BP)人工神经网络对桨的水动力性能进行解析模型, 再采用遗传算法以推进系数、空泡面积和质量为目标实现多目标优化设计。然而, 图谱或回归多项式方法存在对桨叶几何限制较大的问题。基于势流理论的螺旋桨性能预报方法是目前研究中广泛采用的方法, 预报速度较快。TAKEKOSHI等^[4]以升力线法为基础, 采用多项式描述螺旋桨的螺距分布, 用傅里叶级数表达叶剖面厚度和拱度, 并结合非线性序列二次规划算法, 在空化约束下实现了效率最大化, 以及对螺旋桨螺距分布和剖面的优化。赵威等^[5]基于升力面预报程序, 以指定负荷分布为目标, 完成了螺距和拱度的优化设计。饶志强等^[6]基于面元法, 以效率和叶梢最小压力为目标, 对七叶侧斜螺旋桨进行了多目标优化。随着对螺旋桨性能要求的提高, 以及势流方法存在无法考虑流体黏性的局限, 基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的预报方法在螺旋桨优化中逐渐得到应用。GAGGERO等^[7]采用雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds Average Navier-Stokes, RANS)方法, 结合多目标遗传算法, 对泵喷推进器进行了优化设计, 即在给定推力下实现效率最大化并降低空化风险。

余龙等^[8]采用面元法进行初步优化、RANS方法进行深入优化的策略, 对导管桨开展了优化研究。基于CFD的优化方法对计算资源要求较高, 因此常与其他方法结合使用。

综上所述, 针对上述问题与挑战, 结合图谱法与RANS方法, 对某超大型耙吸挖泥船在2种工况下的导管桨设计与优化展开研究。在设计中考虑电机驱动特点, 不限制转速, 分别设计导管定距桨和导管调距桨方案, 并进行比较分析, 以得出有益结论。

1 基于图谱的导管桨设计

1.1 导管定距桨设计

1.1.1 设计任务

目标耙吸挖泥船采用双桨配置。在设计该船的导管桨时, 须综合考虑低速挖泥作业和自由航这2种不同工况的需求。为确保螺旋桨在2种工况下均能高效工作, 设计须以各自工况对应的阻力为基准, 使螺旋桨克服阻力达到目标航速。该船舶在2种工况下的关键参数见表1, 耙吸阻力取值参考文献[9]。

表1 耙吸挖泥船2种工况关键参数

Tab. 1 Key Parameters for Two Operating Conditions of THSD

参数	低速挖泥	自由航行
桨轴中心距基线高度/m	3.75	3.75
吃水 d /m	13.000	10.387
航速 V /kn	5	16
螺旋桨直径 D /m	5	5
缩尺比	27.5	27.5
伴流分数 w	0.297 4	0.252 6
推力减额 t	0.206 5	0.277 0
阻力 R /N	151 780	1 475 420
耙吸力 F_{drag}	$5.7R$	R

1.1.2 设计方法

基于Ka+No.19A系列图谱编写导管桨的设计程序见图1, 该图谱体现推力系数 K_T 、扭矩系数 $10K_Q$ 和敞水效率 η_0 随螺距比 P/D 和进速系数 J 变化对应关系。

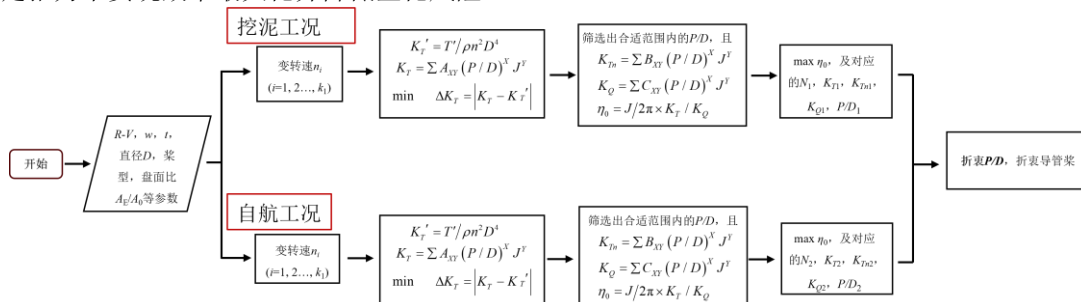


图1 导管定距桨设计流程

Fig. 1 Process of Design of Ducted Fixed-Pitch Propeller

在已知船舶航速 V 、阻力 R 、直径 D 、伴流分数 w 和推力减额 t 的条件下,确定螺距比 P/D 、转速 N 以及表征工况点的 K_T 、 $10K_Q$ 和 η_0 。设计目标为获取约束条件下敞水效率的最大值,具体为

$$\eta_0 = f(J, P/D) \quad (1)$$

推力约束条件为

$$R = T(1-t) \quad (2)$$

对于导管桨,可按下式约束螺旋桨的盘面比 $A_E/A_0^{[10]}$,具体为

$$\frac{A_E}{A_0} = \frac{245P_D}{nD^3(p_0 - p_v - 0.8R_p\gamma)} \quad (3)$$

$$p_0 = p_a + \gamma h_s = 10\,330 + \gamma h_s \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: P_D 为收到功率, hp; n 为螺旋桨转速, r/s; p_0 为桨轴中心处的静压力; p_v 为饱和蒸汽压, 174 kgf/m²; R_p 为螺旋桨半径, m; γ 为海水质量密度, 1 025 kgf/m³; h_s 为桨轴中心线沉深, m。

1.1.3 设计结果

在设计目标工况与空泡限制条件下,基于Ka4-70+No.19A图谱完成了导管定距桨的方案设计。低速挖泥与自由航行2种工况下对应的导管桨参数与工作点见表2。分析表2可知:以效率最大化为目标,针对2种工况分别设计的导管桨方案,其螺距比差异较小。由于空泡条件限制,最终方案选取自由航行工况下的螺距比。由表2可知,低速挖泥工况的效率虽有所降低,但差异<0.5%。

表2 导管桨两工况设计结果与工作点

Tab. 2 Design Results and Operating Points for Two Operating Conditions of Ducted Propeller

工况	低速挖泥	自航	导管定距桨		
	最佳桨	最佳桨	低速挖泥	航行	
螺距比 P/D	1.084 6	0.990 2	0.990 2	0.990 2	
转速 n (r/min)	74.8	131.1	80.3	131.1	
工作点	J	0.263 6	0.511 9	0.245 5	0.511 9
	K_T	0.439 6	0.227 9	0.381 6	0.227 9
	$10K_Q$	0.505 9	0.336 5	0.411 1	0.336 5
	η_0	0.364 5	0.551 8	0.362 7	0.551 8

1.2 导管调距桨设计

为对比导管定距桨与导管调距桨的性能差异,同样依据Ka+No.19A系列导管桨图谱的回归多项式编写设计程序。导管调距桨的设计流程与定距桨类似,但在设计过程中应固定导管桨转速。

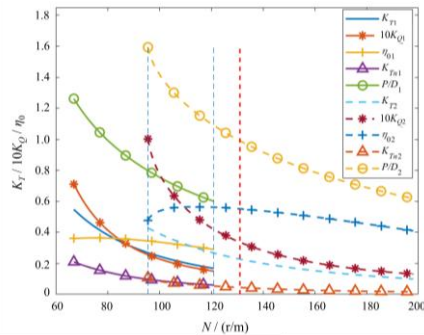
在设计过程中,针对低速挖泥与自由航行2种工况,分别获取导管桨相关参数及工作点随转速的变化规律,并在空泡限制条件下选取效率最高的方案,

最终确定能满足所有条件的折中转速。此外,应对毂径比差异进行修正。设 d_h/D 为设计螺旋桨的毂径比, d_{h0}/D 为系列螺旋桨的毂径比,则所需的螺距比修正量 $\Delta(P/D)$ 的求解公式为

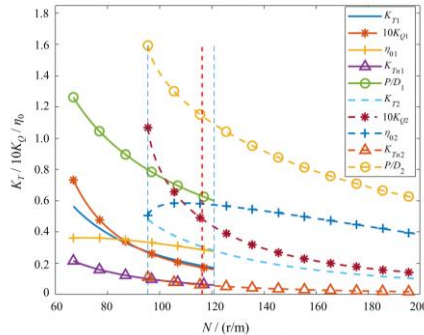
$$\Delta(P/D) = \frac{1}{10}(d_h/D - d_{h0}/D) \quad (5)$$

基于Ka4-70+No.19A图谱得到的导管桨在低速挖泥与自由航行工况下的螺距比及工作点随转速的变化规律见图2(a)。受图谱适用范围限制,低速挖泥工况与自由航行工况的可行工作区域仅存在部分重叠。在该重叠区域内,当转速相同时,可分别确定导管调距桨方案在2种工况下的螺距比及对应工作点。同时,为满足自由航行工况的空泡要求,导管桨转速应在图中红色虚线右侧;该区域并不位于2种工况下导管调距桨的可行域内。因此,基于Ka4-70+No.19A导管桨图谱无法设计出满足空泡要求的导管调距桨。

基于上述分析,采用Ka5-75+No.19A图谱进行导管调距桨设计。导管桨在2种工况下的螺距比及工作点随转速的变化规律见图2(b)。图2中红色虚线右侧至最右侧蓝色虚线左侧的转速范围构成了导管调距桨的可行域。在此区域内,随着转速增加,导管桨在2种工况下的效率均呈下降趋势,因此最优设计方案位于该可行域的左侧边界。在该方案中,导管调距桨在2种工况下的螺距比与工作点具体见表3。



(a) 基于Ka4-70+No.19A的设计结果



(b) 基于Ka5-75+No.19A的设计结果

图2 导管调距桨螺距与工作点随转速的变化

Fig. 2 Pitch Ratio and Working Points of Ducted Controllable-Pitch Propeller Varies with Rotational Speeds

表3 基于 Ka5-75+No.19A 导管调距桨的 2 种工况工作点
Tab. 3 Operating Points for Two Conditions Based on Ka4-70+No.19A Ducted Controllable-Pitch Propeller

工况		低速挖泥	自由航行
螺距比 P/D		0.642 4	1.155 8
转速 $n/(r/min)$		116.4	116.4
工作点	J	0.169 4	0.576 5
	K_T	0.184 0	0.305 5
	$10K_Q$	0.172 7	0.483 2
	η_0	0.287 2	0.580 0

1.3 方案比较

本节比较了导管定距桨与导管调距桨方案的性能差异, 2种方案在2种工况下的具体性能差异: 在自由航行工况下, 2种方案效率一致; 在低速挖泥工况下, 导管定距桨的效率比导管调距桨的效率, 提高了26.43%, 见表4。

表4 导管调距桨与定距桨在 2 种工况下工作点性能比较
Tab. 4 Comparison of Controllable-Pitch Ducted Propeller and Fixed-Pitch Ducted Propeller at Operating Points Under Two Conditions

工况	导管调距桨		导管定距桨	
	低速挖泥	自由航行	低速挖泥	自由航行
螺距比 P/D	0.642 4	1.155 8	1.142 5	1.142 5
转速 $n/(r/min)$	116.4	116.4	71.6	116.4
工作点	J	0.169 4	0.576 5	0.275 3
	K_T	0.184 0	0.305 5	0.492 3
	$10K_Q$	0.172 7	0.483 2	0.594 1
	η_0	0.287 2	0.580 0	0.363 1

2 基于 RANS 方法的导管定距桨多目标优化

2.1 多目标优化平台搭建

2.1.1 基于 CAESES - Star-CCM+的优化平台

本文采用RANS方法对基于Ka4-70+No.19A图谱设计的导管定距桨进行进一步的优化研究。首先基于CAESES与Star-CCM+建立优化平台: CAESES提供三维建模功能和可通过代码控制曲面生成的Feature功能^[11], 以及与仿真软件集成的耦合平台; Star-CCM+具备高效的批处理能力, 可通过脚本控制运行, 从而评估导管桨的水动力性能。通过创建脚本文件, 可将两者集成完成优化平台。

2.1.2 优化目标

在优化过程中, 根据导管桨在低速挖泥与自由航行工况下的推力、效率及空泡性能的综合提升, 确定优化目标的公式为

$$\min -\eta_{01}, \min -\eta_{02}, \min -K_{T1}, \min -K_{T2}, \min A_{cavi2} \quad (6)$$

式中: η_{01} 和 η_{02} 分别为低速挖泥工况与自由航行工况的敞水效率; K_{T1} 与 K_{T2} 分别为低速挖泥工况与自由航行工况的推力系数; A_{cavi2} 为自由航行工况的初生空化系数, 具体定义为低于蒸汽压力的表面积占叶片总面积的百分比^[12], 由于低速挖泥工况产生空化的可能性很小, 仅将自由航行工况的初生空化系数作为优化目标之一。

2.1.3 优化算法

对于多目标优化问题, 通常无法直接求得绝对最优解, 而是寻求更多Pareto解。为此, 本文采用非支配排序遗传算法 (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithms- II, NSGA- II)。该算法通过选择、交叉、变异等运算, 在初始群体中产生新一代群体, 具有并行性、鲁棒性和较好的全局寻优能力。本研究借鉴前人研究成果^[13], 设置交叉概率为0.9, 变异概率为0.01。

2.1.4 导管桨几何模型参数化表达及设计变量

本研究对导管桨转子部分进行参数化建模。转子几何可由沿径向分布的弦长 c 、最大拱度 f_{max} 、最大厚度 t_{max} 、螺距 P 、纵倾 $Rake$ 、侧斜 $Skew$ 以及沿弦向分布的厚度与拱度等参数描述。在优化中, 对各参数的处理如下:

- 1) 转子直径、剖面厚度和纵倾在第2阶段的优化中不进行调整。
- 2) 螺距分布作为决定桨叶负荷及其分布的关键因素, 设为优化变量。
- 3) 弦长分布与盘面比和空泡性能密切相关, 并对效率产生一定影响, 纳入优化变量。
- 4) 侧斜有助于降低螺旋桨在非均匀尾流中运转振动, 并对空泡性能产生一定影响, 设为优化变量。
- 5) 剖面拱度分布对沿螺旋桨弦向分布的负荷有显著影响。本文采用NACA $a=0.8$ 拱线形式以促进弦向负荷均匀化, 并将最大拱度沿径向的分布作为优化参数, 与螺距共同调控桨叶负荷。

综上所述, 本研究的优化参数包括沿径向变化的螺距、弦长、侧斜以及剖面最大拱度。

为表达这些参数, 本文采用光顺性好且局部可控的B样条曲线^[6], 对弦长、螺距、拱度及侧斜沿径向的分布进行拟合。通过调整B样条控制点即可改变各设计变量, 以前述图谱设计的定距桨初始值为基准, 变化范围至少为 $\pm 50\%$ 。拱度弦长比 f/c , f 为剖面最大拱度, c 为剖面弦长。因初始方案中部分控制点绝对值较小, 故均固定为 $-0.05 \sim 0.10$ 。

2.2 优化结果分析

在优化平台上, 针对上述优化目标及设计变量, 分别在2种工况对应的进速系数 J 分别为0.244 1与0.514 3下对导管桨进行多目标全局优化。优化设置种群规模为30, 进行20次迭代, 共生成600个样本,

其中538个为可行解。

可行解在进速系数 $J=0.244$ 1处与 $J=0.514$ 3处的分布见图3。在同一进速系数下,随着推力系数增大,初生空化系数呈上升趋势,表明空泡性能逐渐下降。

对于推力与效率的关系,当进速系数 $J=0.244$ 1时,效率随推力系数增大而降低;当进速系数 $J=0.514$ 3时,效率随推力系数增大先快速上升后转为下降。

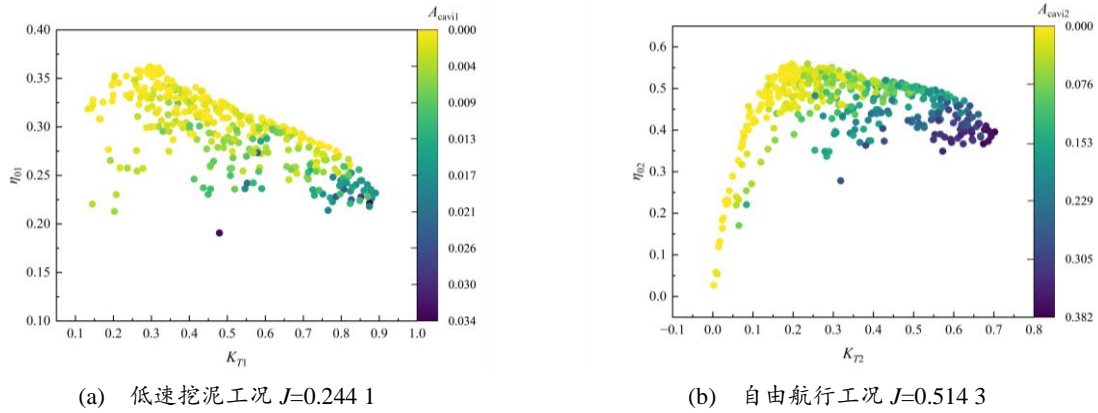


图3 导管桨的性能指标分布

Fig. 3 Distribution of Performance Indicators for Ducted Propellers

在评估通过多目标优化获得的Pareto解集的过程中,由于Pareto解集中的各解均为非劣解,难以直接比较优劣,因此应通过综合评价筛选出折中解。本研究采用熵权法与逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)相结合的评价方法对Pareto解集进行评估。

在排序过程中,首先从所有可行解中筛选出满

足空泡限制的个体,构成新的解集。在此基础上,从该解集中提取Pareto前沿,并对Pareto前沿上的各导管桨方案进行综合排序。排序时,将进速系数 $J=0.244$ 1和 $J=0.514$ 3工况下的推力系数和效率均视为正向指标,采用熵权法计算各指标权重,并运用TOPSIS方法计算各方案的综合评价得分及排序结果见图4。

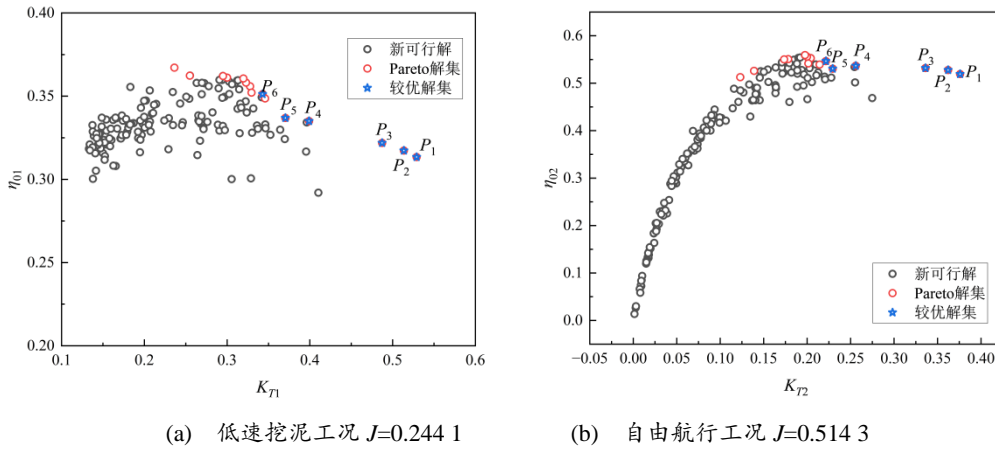


图4 空泡限制下导管桨的性能指标分布

Fig. 4 Distribution of Performance Indicators for Ducted Propellers Under Cavitation Limitation

基于2种工况的推力系数和效率指标,采用熵权法计算各指标对应的权重见表5。依据该权重,通过TOPSIS方法对各方案进行排序,选取综合评价最高的前6个方案在图5中进行标注,并按排序从高到低依次命名为 $P_1 \sim P_6$ 。

为比较各优化方案与原方案在工作点的具体性能差异,计算并绘制各导管桨的敞水性能曲线见图6,

图中明确标注了2种工况对应的具体工作点。

表5 导管桨推力系数和效率在2种工况下的权重

Tab. 5 Weight Values of Thrust Coefficients and Efficiencies of Ducted Propeller in Two Conditions

	K_{T1}	η_{01}	K_{T2}	η_{02}
w_j	0.296 6	0.213 1	0.294 3	0.196 0

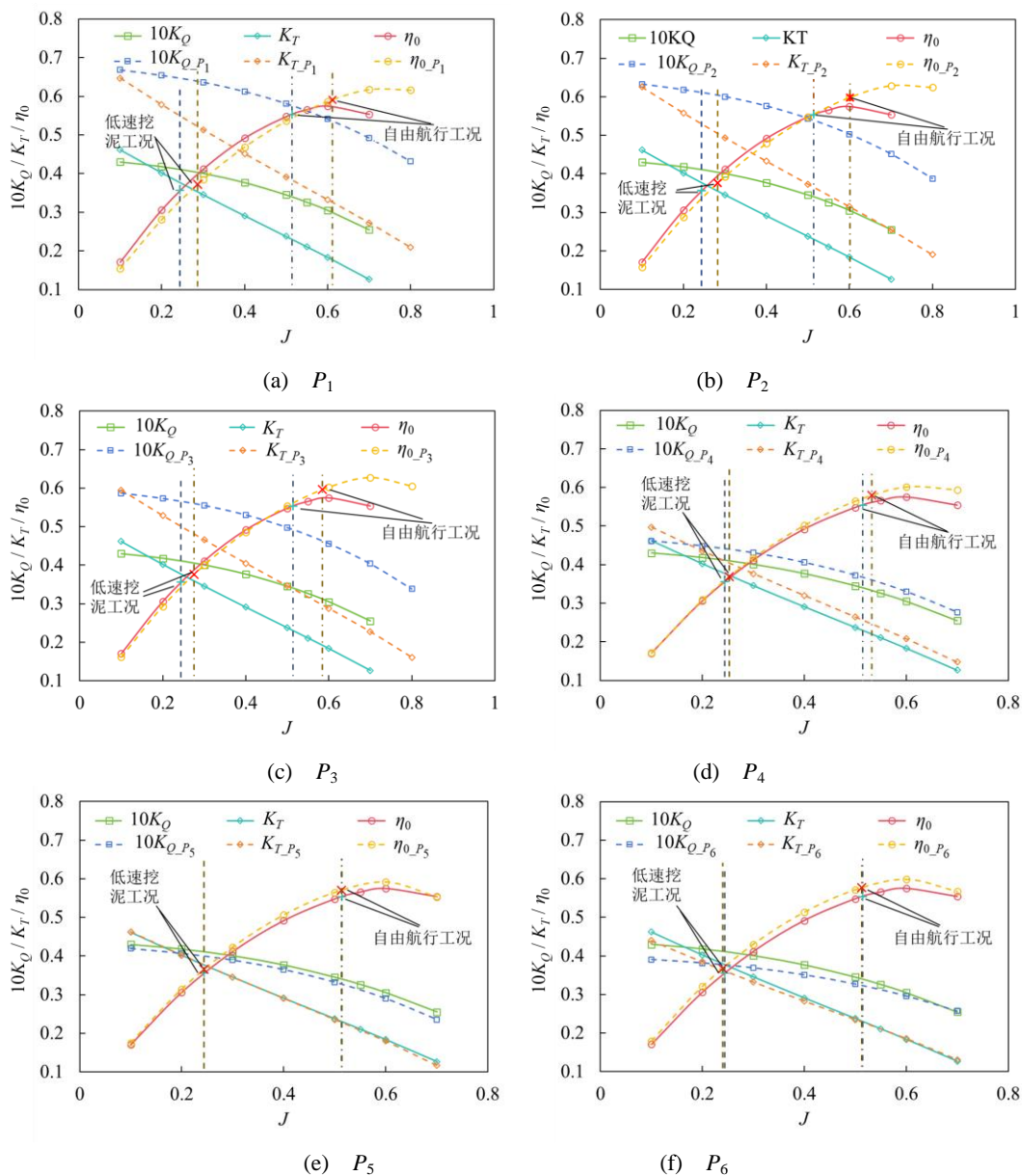


图5 优化方案原导管方案敞水性能比较

Fig. 5 Comparison of Open Water Performance Between Original Ducted Propeller Design and Optimized Cases

由图6可知, 相较于原方案 P_0 , 优化方案 $P_1 \sim P_4$ 在低速挖泥工况与自由航行工况下的工作点均向进速系数增大的方向偏移, 且推力系数有所提高。方案 P_5 、 P_6 与 P_0 在2种工况下的工作点对应的进速系数则十分接近, 且方案 P_6 在低速挖泥工况下的工作点呈现向进速系数减小方向偏移的趋势。该现象表明, 本研究采用的综合评价方法对推力系数较高的方案具有更大的倾向性, 这主要是因为推力系数在排序过程中被赋予了更大的权重。这在一定程度上揭示了几何设计变量对推力系数的综合影响相较于效率更为显著。

提取并分析各优化方案在2种工况下的具体数值, 将其与 P_0 进行对比, 结果见表6。数据分析表明, 所有优化方案在2种工况下的效率均实现了提升。其中, 方案 P_2 与 P_3 的效率提升最为显著: P_2 在低速挖泥工况下效率提升了5.59%, 在自由航行工况下效率提升了8.09%; P_3 在低速挖泥工况下效率提升了5.65%, 在自由航行工况下效率提升了7.70%。方案 P_5 的效率提升幅度最小, 在低速挖泥工况下效率提升了2.62%, 在自由航行工况下效率提升了2.99%。综上所述, 本文采用优化设计方法具有有效性和可行性。

表 6 优化方案与原导管桨在工作点的性能比较

Tab. 6 Performance Comparison of Optimized Cases and Original Ducted Propeller at Operating Points

	J_1	$10K_{Q1}$	K_{T1}	η_{01}	J_2	$10K_{Q2}$	K_{T2}	η_{02}
P_0	0.244 1	0.411 3	0.377 0	0.356 1	0.514 3	0.340 1	0.230 0	0.553 6
P_1	0.287 1	0.639 2	0.521 5	0.372 8	0.611 8	0.536 3	0.325 6	0.591 2
$\Delta\eta_0$	—	—	—	4.69%	—	—	—	6.79%
P_2	0.282 5	0.603 6	0.504 8	0.376 0	0.601 1	0.502 4	0.314 2	0.598 3
$\Delta\eta_0$	—	—	—	5.59%	—	—	—	8.09%
P_3	0.275 5	0.559 9	0.480 4	0.376 2	0.584 5	0.463 6	0.297 1	0.596 2
$\Delta\eta_0$	—	—	—	5.65%	—	—	—	7.70%
P_4	0.252 7	0.440 0	0.403 9	0.369 2	0.532 4	0.360 2	0.246 5	0.579 9
$\Delta\eta_0$	—	—	—	3.68%	—	—	—	4.75%
P_5	0.244 0	0.400 2	0.376 6	0.365 4	0.512 9	0.327 6	0.228 8	0.570 1
$\Delta\eta_0$	—	—	—	2.62%	—	—	—	2.99%
P_6	0.239 5	0.377 3	0.363 2	0.366 9	0.512 9	0.323 7	0.228 7	0.576 7
$\Delta\eta_0$	—	—	—	3.04%	—	—	—	4.19%

方案 P_2 、 P_3 与 P_0 的几何形状及表面压力分布见图6。由图6可知：相较于 P_0 ，2个优化方案转子压力面的压力值均有所提高，同时吸力面上压降较大的范围有所扩大且分布更为均匀。比较 P_2 与 P_3 可知：在低速挖泥工况下， P_3 转子表面的压力分布更均匀；在自由航行工况下， P_2 的压力分布更均匀。这与 P_2 在自由航行工况下效率略高、 P_3 在低速挖泥工况下效率略高的结果一致。

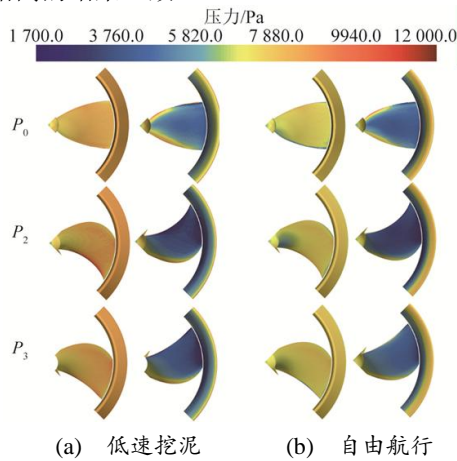
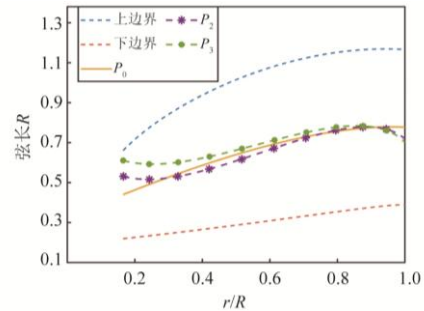


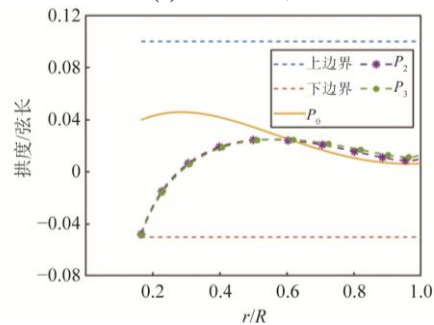
图 6 导管桨表面压力分布

Fig. 6 Pressure Distributions on Surfaces of Ducted Propellers

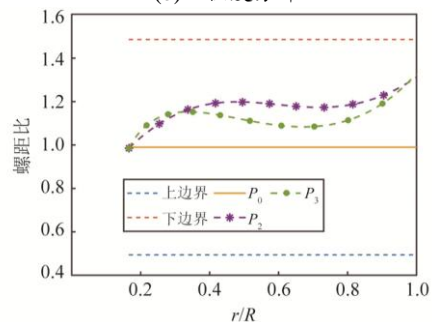
由图6可知， P_2 与 P_3 的几何形状较为接近，各方案的几何参数分布及其变化范围见图7。由图7可知：2个优化方案的几何参数均处于设计变量的变化范围内。比较各方案的几何分布可知：相较于 P_0 ， P_2 与 P_3 在桨叶叶根处的弦长有所增大，叶梢处的弦长相对较小； P_2 的弦长变化趋势与 P_3 相似，但整体略小于 P_3 。



(a) 弦长分布



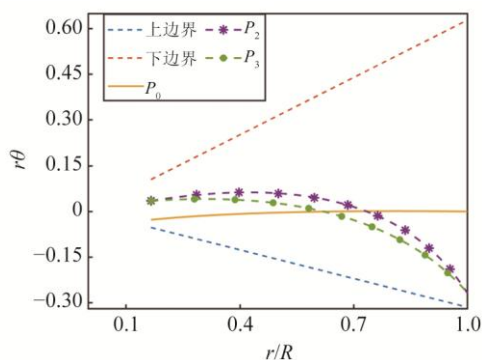
(b) 拱度分布



(c) 螺距分布

图 7 方案 P_2 、 P_3 与 P_0 几何分布比较

Fig. 7 Comparison of Geometric Distribution Between P_0 , P_2 and P_3



(d) 侧斜分布

图7 方案 P_2 、 P_3 与 P_0 几何分布比较 (续)

Fig. 7 Comparison of Geometric Distribution Between P_0 , P_2 , and P_3 (Continued)

螺旋桨的拱度与螺距比是决定桨叶表面载荷分布的关键参数。与 P_0 相比, P_2 与 P_3 的螺距较大而拱度较小, 这2个方面的变化共同促使推力系数提高。同时, 相较于 P_3 , P_2 的螺距更大, 导致 P_2 的推力系数高于 P_3 。 P_2 与 P_3 的敞水性能曲线见图8: 当进速系数较低时, P_3 的效率略占优势; 当进速系数较高时, P_2 的效率略占优势。

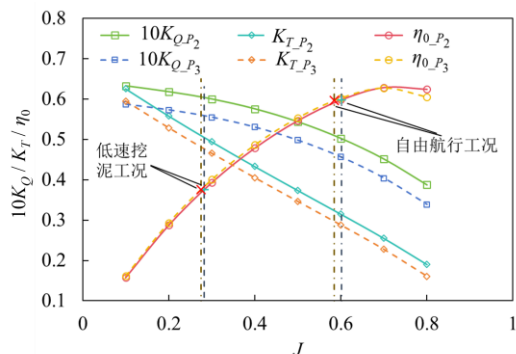


图8 P_2 与 P_3 的敞水曲线与工作点

Fig. 8 Open Water Curves and Operating Points of P_2 and P_3

3 结论

在低碳绿色发展的背景下, 本文围绕多工况推进器的优化设计展开研究, 以耙吸挖泥船推进器为对象, 基于图谱方法设计并对比了无转速约束下导管定距桨与导管调距桨的性能差异。在此基础上, 结合RANS方法与优化算法构建了导管桨在低速挖泥与自由航行2种工况下的多目标优化方法, 并完成了优化设计, 主要有3个结论。

1) 基于Ka+No.19A图谱, 耙吸挖泥船分别在低速挖泥工况与自由航行工况下得到的最佳导管桨的螺距比十分接近, 因此可获得在2种工况下均有较高效率的导管定距桨方案。

2) 基于Ka+No.19A图谱针对2种工况设计的导管调距桨, 比导管定距桨对盘面比的要求更高, 且在低速挖泥工况下, 定距桨的效率更高。

3) 采用RANS方法和NSGA-II算法, 在搭建的多目标优化平台上对兼顾2种工况的导管定距桨敞水性能进行多目标优化。所得的2个最优方案在低速挖泥工况下效率分别提升5.65%与5.59%, 在自由航行工况下效率分别提高了7.70%与8.09%, 验证了所采用的多目标优化策略在提升导管桨综合性能方面的可行性。

参考文献:

- [1] BENINI E. Multiobjective Design Optimization of B-screw Series Propellers Using Evolutionary Algorithms[J]. Marine Technology and Sname News, 2003, 40(4): 229-238.
- [2] 贾小俊. 船用导管螺旋桨优化设计的分析[J]. 交通科技, 2003(1): 57-58.
JIA X J. The Analysis of the Optimality Design of Duct Propeller of Ship[J]. Transportation Science & Technology, 2003(1): 57-58.
- [3] 曾志波, 丁恩宝, 唐登海. 基于BP神经网络和遗传算法的船舶螺旋桨优化设计[J]. 船舶力学, 2010, 14(增刊 1): 20-27.
ZENG Z B, DING E B, TANG D H. Ship Propeller Design Optimization Based on BPneural Network and Genetic Algorithm[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(Suppl. 1): 20-27.
- [4] TAKEKOSHI Y, KAWAMURA T, YAMAGUCHI H, et al. Study on the Design of Propeller Blade Sections Using the Optimization Algorithm[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2005, 10(2): 70-81.
- [5] 赵威, 杨晨俊. 船舶螺旋桨螺距及拱度的优化设计研究[J]. 中国造船, 2010, 51(1): 1-8.
ZHAO W, YANG C J. Research on Optimized Design of the Pitch and Camber of Marine Propellers[J]. Shipbuilding of China, 2010, 51(1): 1-8.
- [6] 饶志强, 杨晨俊. 七叶侧斜螺旋桨水动力性能优化[J]. 中国造船, 2016, 57(4): 1-13.
RAO Z Q, YANG C J. Optimization of Hydrodynamic Performance of Seven-bladed Skewed Propeller[J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(4): 1-13.
- [7] GAGGERO S, MARTINELLI M. Design and Analysis of Pumpjet Propulsors Using CFD-Based Optimization [J]. Ocean Engineering, 2023, 277: 114304.
- [8] YU L, DRUKENBROD M, GREVE M, et al. Research on Automatic Optimization of Ducted Propeller Design Based on CFD Techniques[J]. Chinese Journal of

- Hydrodynamics (A), 2013, 28(4): 438-444.
- [9] 罗治高, 金华, 余龙. 考虑耙吸力的耙吸挖泥船阻力性能数值分析及试验比较[J]. 船舶工程, 2020, 42(8): 44-49.
- LUO Z G, JIN H, YU L. Numerical Analysis and Experiment Comparison of Resistance Performance for the Trailing Suction Hopper Dredger with Drag Force[J]. Ship Engineering, 2020, 42(8): 44-49.
- [10] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(下)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- SHENG Z B, LIU Y Z. Principles of Naval Architecture (Part 2)[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2003.
- [11] 丁东宇, 姚汝林, 罗宁, 等. 基于快速性的中型邮轮线型优化[J]. 船舶工程, 2022, 44(5): 1-7.
- DING D Y, YAO R L, LUO L, et al. Lines Optimization for a Medium Cruise Ship Based on Rapidity[J]. Ship Engineering, 2022, 44(5): 1-7.
- [12] YU L, DRUCKENBROD M, GREVE M, et al. Numerical and Experimental Analysis of a Ducted Propeller Designed by a Fully Automated Optimization Process Under Open Water Condition[J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(5): 733-744.
- [13] 甘新宸, 丁东宇, 余龙. 考虑艉部线型的邮轮吊舱推进器设计优化[J]. 船舶工程, 2023, 45(5): 66-72.
- GAN X C, DING D Y, YU L. Optimization Design for Podded Propulsors of Cruise Ship Considering Stern Lines[J]. Ship Engineering, 2023, 45(5): 66-72.
-
- (上接第 71 页)
- [29] 谢文彬, 曹秀清. 中心体空化喷嘴数值模拟和参数优化[J]. 船舶工程, 2024, 46(8): 68-77.
- XIE W B, CAO X Q. Numerical Simulation and Parameter Optimization of Central Body Cavitation Nozzle[J]. Ship Engineering, 2024, 46(8): 68-77.
- [30] HABIL S I. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics[C]//4th International Conference on Multiphase Flow. 2001.
- [31] 张志伟, 刘建军. 各种湍流模型在 FLUENT 中的应用[J]. 河北水利, 2008(10): 25-26.
- ZHANG Z W, LIU J J. Application of Various Turbulence Models in FLUENT[J]. Hebei Water Resources, 2008(10): 25-26.
- [32] 孙鹏飞, 周正权, 陈祎, 等. 基于 CFD 的自激振动空化射流喷嘴结构参数影响研究[J]. 流体机械, 2019, 47(10): 1-7.
- SUN P F, ZHOU Z Q, CHEN Y, et al. Research on the Influence of Structural Parameters of Self-Excited Vibration Cavitation Jet Nozzle Based on CFD[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(10): 1-7.
- [33] 姚立明, 赵怡, 李大尉, 等. 几种空化喷嘴流场的数值模拟[J]. 节能技术, 2015, 33(1): 20-24.
- YAO L M, ZHAO Y, LI D W, et al. Numerical Simulation of the Flow Fields of Several Cavitation Nozzles[J]. Energy Conservation Technology, 2015, 33(1): 20-24.
- [34] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2006.
- XUE S X. High-Pressure Water Jet Technology Engineering[M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2006.
- [35] 奉虎, 杨永印, 王艳涛, 等. 低压缩扩形喷嘴空化射流数值模拟及试验研究[J]. 石油机械, 2018, 46(4): 55-59.
- FENG H, YANG Y Y, WANG Y T, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on Cavitation Jet of Low-Compression-Expansion Nozzle[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(4): 55-59.
- [36] 张楚谦, 陈勇刚, 赵梁. 基于大涡模拟方法的可压缩空化流流场数值模拟分析[J]. 广东化工, 2024, 51(4): 65-68.
- ZHANG C Q, CHEN Y G, ZHAO L. Numerical Simulation and Analysis of Compressible Cavitation Flow Field Based on Large Eddy Simulation Method[J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(4): 65-68.
- [37] 王天宇, 李兴, 张昆明, 等. 亥姆霍兹自振空化装置流场特性的数值模拟[J]. 广西科技大学学报, 2021, 32(1): 1-11.
- WANG T Y, LI X, ZHANG K M, et al. Numerical Simulation of Flow-Field Characteristics of Helmholtz Self-Excited Cavitation Device[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2021, 32(1): 1-11.
- [38] 程西怡, 李红梅, 韩丹, 等. 喷嘴内云空化瞬态特性的湍流模型适用性研究[J]. 西安交通大学学报, 2025(10), 160-169.
- CHENG X Y, LI H M, HAN D, et al. Study on the Applicability of Turbulence Models for Transient Characteristics of Cloud Cavitation in Nozzles[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025(10): 160-169.