



基于阻力和伴流不均匀度的21万吨散货船线型优化

程保国 郝金凤 强兆新

Lines optimization of 210 000 DWT bulk carrier based on resistance and wake non-uniformity

CHENG Baoguo, HAO Jinfeng, QIANG Zhaoxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03236>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

散货船双层底纵桁板缝布置和尺寸优化设计

Plate seam arrangement and size optimization of bulk carrier double bottom girders

中国舰船研究. 2023, 18(3): 32-37 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02517>

循环水槽船模阻力试验不确定度分析

Uncertainty analysis of ship model resistance measurement in circulating water channel

中国舰船研究. 2020, 15(4): 144-152 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01658>

基于高斯近似和NSGA-II的伴流螺旋桨优化

Optimization of wake propeller based on Gaussian approximation and NSGA-II

中国舰船研究. 2023, 18(4): 197-205 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02892>

船舶月池的阻力与流场特性及其改进型式

The resistance and flow field characteristics of moonpool and its improvement forms

中国舰船研究. 2020, 15(3): 45-53, 101 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01594>

船模阻力CFD/EFD预报的不确定度抑制方法

Uncertainty suppression methods for CFD/EFD resistance prediction of ship model

中国舰船研究. 2023, 18(6): 49-59 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03103>

考虑伴流场中螺旋桨水动力的舰船长轴系校中及优化

Long marine shafting alignment and optimization considering propeller hydrodynamic force in wake field

中国舰船研究. 2023, 18(2): 243-250 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02662>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03236>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 程保国, 郝金凤, 强兆新. 基于阻力和伴流不均匀度的21万吨散货船线型优化[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 241–246.

CHENG B G, HAO J F, QIANG Z X. Lines optimization of 210 000 DWT bulk carrier based on resistance and wake non-uniformity[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(4): 241–246 (in Chinese).

基于阻力和伴流不均匀度的21万吨散货船线型优化



扫码阅读全文

程保国*, 郝金凤, 强兆新

中船重工船舶设计研究中心有限公司, 北京 100081

摘要: [目的] 基于船体绕流场计算分析, 以阻力和伴流不均匀度为优化目标, 对21万吨散货船线型进行优化设计。[方法] 首先, 借助计算流体动力学(CFD)工具对初始线型进行数值评估并计算船体绕流场, 得到波形、压力分布、速度分布等流场特征。其次, 根据CFD计算结果, 构建优化策略, 形成改型方案, 并对改型方案进行CFD计算, 评估阻力和伴流不均匀度优化效果。最后, 开展优化后船型快速性模型试验, 验证优化效果。[结果] CFD计算结果表明, 改型相较于原型, 有效功率降低了2.46%, 伴流不均匀度降低了8.48%。模型试验结果表明, 改型相较于原型, 螺旋桨收到功率降低了3.49%。[结论] 研究显示, 所提出的优化方法可以获得阻力性能优良、伴流场均匀性好的船体线型, 具有较强的工程适用性。

关键词: 流场; 阻力; 伴流不均匀度; 散货船; 线型优化; 计算流体动力学

中图分类号: U662

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03236

Lines optimization of 210 000 DWT bulk carrier based on resistance and wake non-uniformity

CHENG Baoguo*, HAO Jinfeng, QIANG Zhaoxin

China Ship Design & Research Center Co., Ltd, Beijing 100081, China

Abstract: [Objectives] This study calculates and analyzes the flow field around the hull of a 210 000 DWT bulk carrier in order to perform hull line optimization with resistance and wake non-uniformity as the optimization objectives. [Methods] Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to evaluate the initial hull lines, calculate the flow field around the ship and obtain flow field characteristics such as the wave pattern, pressure distribution, velocity distribution, etc. According to the CFD calculation results, an optimization strategy is constructed to form the modified hull lines. CFD calculation is then carried out on the modified lines to evaluate the optimization effects on resistance and wake non-uniformity. Finally, a model test of the optimized hull form's power delivery performance is carried out to verify the optimization effects. [Results] The CFD calculation results show that compared with the initial hull form, the effective power of the modified hull form is reduced by 2.46% and the wake non-uniformity is reduced by 8.48%, while the model test results show that compared with the initial hull form, the delivered power of the modified hull form is reduced by 3.49%. [Conclusions] The proposed optimization method can obtain hull lines with excellent resistance performance and good wake field uniformity, giving it strong engineering applicability.

Key words: flow field; resistance; wake non-uniformity; bulk carrier; lines optimization; computational fluid dynamics (CFD)

0 引言

21万吨散货船是备受市场欢迎的适航于澳

大利亚纽卡斯尔港的最大型散货船, 也是适用于南美、非洲等国重要矿资源输出到主要欧亚物流目的港的最佳船型。目前该船型主要投放于中国

收稿日期: 2023-01-03 修回日期: 2023-05-26 网络首发时间: 2023-08-04 11:54

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目(工信部装函[2019]360)

作者简介: 程保国, 男, 1984年生, 硕士, 高级工程师

郝金凤, 女, 1978年生, 硕士, 研究员

强兆新, 男, 1975年生, 硕士, 研究员

*通信作者: 程保国

到澳大利亚或到巴西的航线。随着全球特别是亚洲地区钢铁工业的快速发展,世界铁矿石贸易量大幅提高,21万吨散货船的市场需求不断增长,船队规模不断扩大。但是,目前该船型的设计方案距离满足新造船能效设计指数(EEDI)第3阶段的要求还有较大差距。因此,当前设计难以满足未来市场需求,性能有待进一步优化。具体表现在如何进一步优化船体线型,降低船舶阻力,提高船舶推进效率,降低船舶能耗水平等方面。

孙海素等^[1]利用CFD数值工具研究了20万吨级垂直艏散货船艏部线型对阻力性能的影响,发现适当增大进流角有利于改善阻力性能。班业平^[2]针对20万吨级散货船设计了3种线型方案,通过采用CFD方法及模型试验方法,优选出具有最佳阻力性能和推进性能的线型方案。研究表明,与传统的球鼻型艏相比,垂直型船首能降低船舶所受阻力。次洪恩等^[3]在20.8万吨散货船的线型优化中,既考虑了船舶在静水中的快速性能,也考虑了船舶在波浪中的增阻问题。研究发现,与传统的球鼻艏线型相比,垂直艏线型可以有效降低船舶在波浪中航行的阻力。

上述针对目标船型进行的船体线型优化研究^[1-4]均是以阻力性能为目标对船舶首尾形状进行优化。但是,在船体线型优化过程中,如果片面追求低阻力,有可能会降低桨盘面处伴流场品质,从而影响推进效率^[5-8]。因此,在船型优化中,艏部流场的品质也应该受到重视^[9-12]。

本文以21万吨散货船为研究对象,以阻力和伴流不均匀度为优化目标,开展船体线型优化设计。基于船体绕流场CFD计算结果,构建优化策略,形成改型方案。通过CFD计算,评估阻力和伴流不均匀度优化效果。最后,通过快速性模型试验,验证收到功率的优化效果,以验证该方法的有效性。

1 初始船型要素

本文的优化对象为中船重工船舶设计研究中心有限公司设计、中国船舶集团青岛北海造船有限公司建造的21万吨散货船,记为初始船型方案M0,其几何外形见图1,主要参数见表1。

本船线型优化目标与要求如下:

- 1) 主尺度保持不变;
- 2) 优化设计吃水 $T_d=16.1\text{ m}$,设计航速 $V_s=14.5\text{ kn}$ 下的快速性水动力性能,船后螺旋桨收到功率降低不小于3%;
- 3) 排水量变化小于0.5%;
- 4) 满足机舱布置要求。

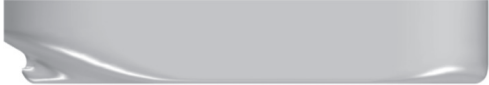


图1 初始船型几何外形
Fig. 1 Initial hull geometry

表1 初始船型主尺度和参数

Table 1 Principal dimensions and parameters of initial hull form

参数	数值
垂线间长 L_{pp}/m	295.15
型宽 B/m	50
设计吃水 T_d/m	16.1
方形系数 C_b	0.8420
设计航速 V_s/kn	14.5

2 初始船型性能评估

2.1 CFD计算方法

采用STAR-CCM+软件模拟模型尺度下的流场。基于RANS算法,考虑了水的黏性效应和船舶自由表面兴波的影响。湍流模式选取SST $k-\omega$ 湍流模型进行计算,自由表面计算采用VOF方法。由于船舶具有左右舷对称的特点,计算中采用半船模型。

在本文数值计算中,采用H型的计算域。计算域的边界包括以下几个部分:前端——船模艏部向前大于1.5倍船长;后端——船模尾部向后大于2倍船长;船侧边界——船模舷侧方向大于1.5倍船长;上边界——船模顶部距上边界大于1倍船长;下边界——船模底部向下大于2倍船长。

计算域边界条件设置为:计算域前端设为速度入口;计算域上边界、下边界设置为滑移壁面条件;船侧边界和中心对称面设为对称边界条件;计算域后端设为压力出口;船体设定为固壁条件,满足壁面无滑移假定。

本研究中网格生成采用STAR-CCM+中经典的切割体网格。网格划分时,对船体边界层、船首、船尾以及船舶自由表面区域都进行了加密处理,以保证壁面附近和船体兴波扩展区等关键区域的网格质量。壁面边界层网格 $y^+=50$,计算域内网格单元总数约为210万,计算域网格划分见图2。在优化过程中,其他船型采用与初始船型一致的计算设置和网格划分方法,具有与初始船型相似的网格质量。

2.2 伴流不均匀度计算方法

伴流场的质量可以从伴流分数和伴流不均匀

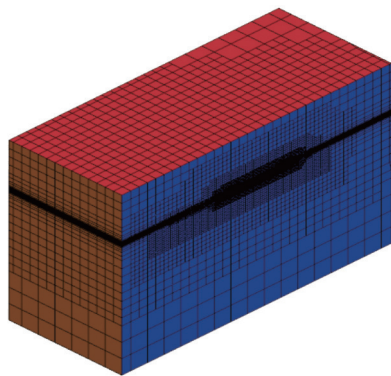


图 2 计算域网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of computational domain meshing

度两个方面衡量^[13]。衡量伴流不均匀度的常用方法为 BSRA 5 项衡准, 该方法考虑了很多因素, 但在对大量计算结果进行比较判断时比较繁琐。本文采用荷兰 MARIN 水池提出的伴流目标函数 WOF (wake object function)^[14] 衡量伴流的不均匀度, WOF 越小说明伴流越均匀, 反之则均匀性越差。计算公式如下:

$$\text{WOF} = \frac{\sum_{r=0.6R}^R \sqrt{\frac{1}{36} \sum_{\varphi=0^\circ}^{350^\circ} \left[W_{\text{axial}}(r, \varphi) - \frac{1}{36} \sum_{\varphi=0^\circ}^{350^\circ} W_{\text{axial}}(r, \varphi) \right]^2}}{\sum_{r=0.6R}^R \frac{1}{36} \sum_{\varphi=0^\circ}^{350^\circ} W_{\text{axial}}(r, \varphi)} \quad (1)$$

$$W_{\text{axial}}(r, \varphi) = 1 - \frac{V_{\text{axial}}}{V} \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{36} \sum_{\varphi=0^\circ}^{350^\circ} W_{\text{axial}}(r, \varphi) \quad (3)$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{36} \sum_{\varphi=0^\circ}^{350^\circ} \left[W_{\text{axial}}(r, \varphi) - \frac{1}{36} \sum_{\varphi=0^\circ}^{350^\circ} W_{\text{axial}}(r, \varphi) \right]^2} \quad (4)$$

式中: R 为螺旋桨半径; V_{axial} 为轴向水流速度; V 为船速; W_{axial} 为轴向伴流分数; r 值范围为 $0.6R \sim 1.0R$, 间隔 $0.1R$; φ 值范围为 $0^\circ \sim 350^\circ$, 间隔 10° ; A 为桨盘面某个半径处轴向伴流分数的平均值; B 为桨盘面某个半径处轴向伴流分数的标准差。

2.3 评估结果及分析

在设计吃水 16.1 m 和设计航速 14.5 kn 的工况下, 采用黏流软件 STAR-CCM+对初始船型方案进行静水阻力数值模拟, 缩尺比为 1:42.727, 淡水水温 15 ℃, 计算中不带舵, 不安装螺旋桨。

表 2 为初始船型船模阻力计算结果, 包括粗网格和细网格, 同时给出了模型试验结果^[15]。从

表 2 中可以看出, 粗网格下总阻力系数 C_{tm} 数值模拟计算值与模型试验测量值相差 1.40%, 细网格下数值模拟计算值与模型试验测量值相差 0.70%, 吻合结果良好, 验证了网格收敛性和本文计算方法的可靠性。

表 2 初始船型总阻力系数	
Table 2 Total resistance coefficient of initial hull form	
参数	数值
试验值 C_{tm}	3.737×10^{-3}
粗网格模拟值 C_{tm}	3.789×10^{-3}
细网格模拟值 C_{tm}	3.763×10^{-3}
粗网格计算误差/%	1.40
细网格计算误差/%	0.70

计算得到的初始船型自由表面波形如图 3 所示。从图中可以看出, 艏波峰较高, 船身波形较为平缓, 峰谷不明显, 总体性能较好。基于 CFD 数值计算以及模型试验数据库, 发现本船线型阻力性能表现优良。

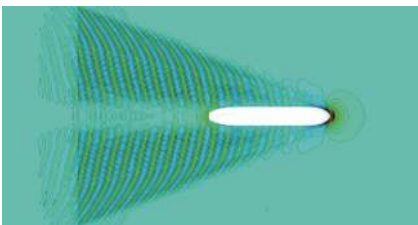


图 3 初始船型自由表面波形

Fig. 3 Wave pattern on free surface of initial hull form

计算得到的初始船型船体表面压力分布如图 4 所示。从图中可以看出, 船体表面低压区集中在 16#~18#肩部和 19#附近的舳部以及艉部 2#~4#部分。

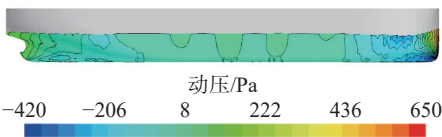


图 4 初始船型船体表面压力分布

Fig. 4 Pressure distribution on hull surface of initial hull form

计算得到的初始船型桨盘面轴向伴流分布如图 5 所示, 从图中可以看出艉部伴流峰值较高。

3 船体线型优化

3.1 优化策略

本船初始线型方形系数较大, 其设计工况下的傅里叶数较低, 为 0.138。船首的形状、大小、艏部进流角、设计水线局部形状、排水体积纵向

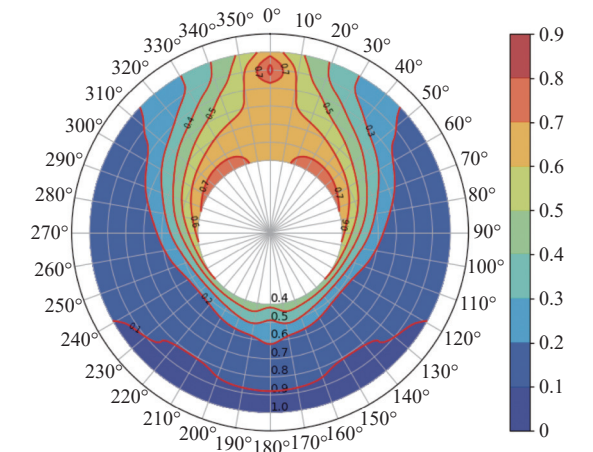


图 5 初始船型桨盘面轴向伴流分布

Fig. 5 Axial wake distribution on propeller disk plane of initial hull form

分布等因素均对船型的阻力有较为明显的影响。

本文采用基于特征参数的全参数化建模方法进行船体建模,实现船体线型的参数化变换。根据初始线型 CFD 计算结果,选取艏部设计水线丰满度、甲板边线丰满度、设计水线外飘角、甲板边线外飘角等参数作为艏部特征参数,对艏部形状进行优化,改善艏部船体表面压力分布,减小艏肩处的低压区范围,同时降低水面兴波的波幅,以减小阻力;选取艉部设计水线丰满度、甲板边线外飘角、艉轴上方最大反曲位置、艉封板高度等参数作为艉部特征参数,对艉部形状进行优化,改善艉部压力分布和伴流均匀度,以减小阻力和提升推进效率。

3.2 优化方案

结合船体模型参数化变换和 CFD 分析,通过对选取的艏艉特征参数进行优化迭代,选出波形较平缓、压力分布较均匀、伴流分布较均匀的艏艉特征参数取值及相应的船型方案,记为优化船型方案 M1。M1 和 M0 的主要参数对比见表 3,从表中可以看出优化船型满足线型优化关于主尺度和排水量的约束条件。

表 3 主要船型参数对比

Table 3 Comparison of main parameters of hull form

参数	初始方案M0	优化方案M1	变化量
垂线间长 L_{pp}/m	295.15	295.15	0
型宽 B/m	50	50	0
设计吃水 T_d/m	16.1	16.1	0
方形系数 C_b	0.8420	0.8402	-0.21%

优化线型 M1 与初始线型 M0 对比图见图 6。检查优化线型在机舱位置处的横剖面,发现其满足主机布置要求。

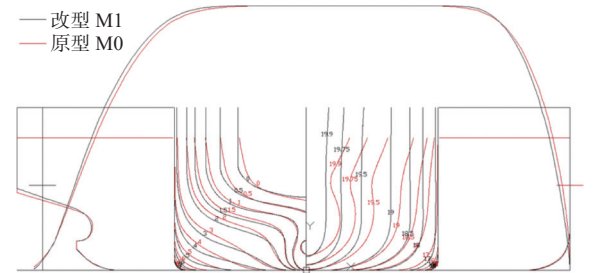


图 6 优化线型 M1 与初始线型 M0 对比

Fig. 6 Comparison between optimized lines M1 and initial lines M0

3.3 CFD 计算结果及分析

采用 STAR-CCM+流体力学分析软件对优化线型方案 M1 在设计吃水和设计航速工况下进行船模静水阻力数值模拟,缩尺比和计算条件与初始线型方案 M0 相同。将计算结果按照 ITTC 推荐的船模/实船相关方法将模型阻力预报到实船的有效功率。CFD 计算的阻力优化效果见表 4。从表 4 中可以得出:设计吃水与设计航速下,与初始船型 M0 相比,优化船型 M1 的船模阻力降低了 1.55%,实船阻力和有效功率降低了 2.46%。

表 4 阻力 CFD 计算结果对比

Table 4 Comparison of CFD calculation results of resistance

参数	初始线型M0	优化线型M1
实船航速 V_s/kn	14.5	14.5
船模速度 $V_m/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.141	1.141
船模总阻力 R_m/N	28.53	28.09
实船总阻力 R_s/kN	1101	1074
有效功率 P_E/kW	8212	8010
R_m 变化量	-	-1.55%
R_s 和 P_E 变化量	-	-2.46%

优化线型 M1 的自由表面波形如图 7 所示。与初始线型 M0 的自由表面波形(图 3)对比可以看出,横波及散波改善较为明显。优化线型 M1 的船体表面压力分布如图 8 所示。与初始线型 M0 的船体表面压力分布(图 4)对比可以看出,艏肩处低压区前移,极值和低压区范围也有所降低,艉部 4#水线处的低压区也有所改善。

优化线型 M1 的桨盘面轴向伴流分布如图 9 所示,与初始线型 M0 的桨盘面轴向伴流分布(图 5)对比可以看出,艉部伴流均匀性有所改善。从图 5 和图 9 中提取不同径向和周向位置的轴向伴流分数,根据式(1)~式(4)可计算得到初始船型和优化船型桨盘面伴流目标函数 WOF 值,结果见表 5。从表 5 中可以看出,优化后的船型伴流目标函数值降低了 8.48%。

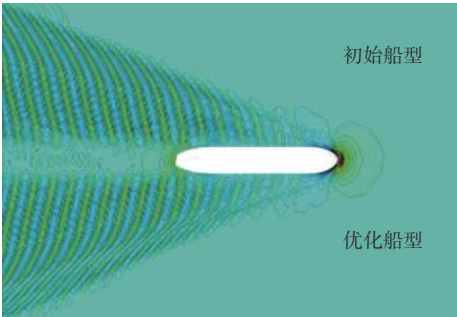


图 7 优化船型与初始船型自由表面波形对比

Fig. 7 Wave pattern comparison on free surface of optimized and initial hull form

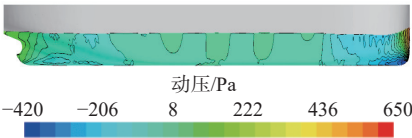


图 8 优化船型船体表面压力分布

Fig. 8 Pressure distribution on hull surface of optimized hull form

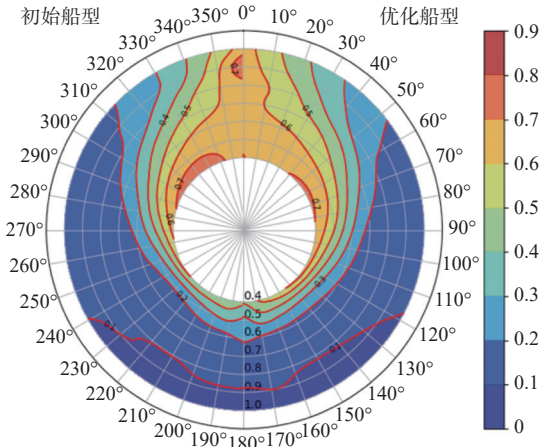


图 9 优化船型与初始船型桨盘面轴向伴流分布对比

Fig. 9 Axial wake distribution comparison on propeller disk plane of optimized and initial hull form

表 5 伴流目标函数计算结果对比

Table 5 Comparison of calculation results of WOF						
r	初始线型M0			优化线型M1		
	A	B	WOF	A	B	WOF
0.6R	0.333	0.189		0.363	0.176	
0.7R	0.264	0.177		0.285	0.175	
0.8R	0.221	0.165	0.696	0.235	0.167	0.637
0.9R	0.202	0.166		0.208	0.154	
1.0R	0.185	0.141		0.193	0.146	

4 船模试验

为验证优化线型方案的快速性水动力性能, 将优化后的线型方案委托中国船舶科学研究中心进行了快速性船模试验。试验在 01 拖曳水池 (474 m × 14 m × 7 m) 中进行, 内容包括设计吃水

下的阻力试验、带库存桨的自航试验和库存桨的敞水试验。船模系木质, 表面油漆光滑, 在距船模艏部 $L_{pp}/20$ 处安装有直径为 1 mm 的激流丝, 船模缩尺比为 1:42.727。库存桨为初始线型的设计桨, 桨模系铝制成, 缩尺比亦为 1:42.727。在阻力试验中, 不安装螺旋桨模型, 以假毂代替。船模由艏艉导航杆导引, 可以自由升沉和纵倾, 但横摇和艏摇运动受到约束。船模拖曳速度由实船速度依据弗劳德数相似换算得到, 试验过程中测量模型的总阻力和拖车速度。自航试验采用强迫自航法, 即对应每个航速。分别调整 4 个螺旋桨转速, 在每一个转速中, 测量强制力、螺旋桨推力、扭矩和转速。在螺旋桨敞水试验中, 采用定转速变车速的方法, 测量拖车速度、螺旋桨的转速、推力和扭矩。试验数据的处理和实船预报按照 ITTC 标准程序进行。

表 6 给出了设计吃水设计航速下优化线型方案船模试验结果与初始线型方案船模试验结果^[15]对比, 包括阻力性能和推进性能。从表 6 中可以看出, 设计工况下, 优化方案有效功率降低 2.46%, 推进效率提高 1.05%, 船后收到功率降低 3.49%, 达到了优化目标。

表 6 船模试验结果对比

Table 6 Comparison of ship model test results

方案	初始线型M0	优化线型M1
航速 V_s/kn	14.5	14.5
有效功率 P_E/kW	8207	8004
推进效率 η_D	0.747	0.755
螺旋桨收到功率 P_{DT}/kW	10987	10604
P_E 变化量	—	-2.46%
η_D 变化量	—	1.05%
P_{DT} 变化量	—	-3.49%

5 结 论

本文针对选定的 21 万吨散货船, 基于初始船型流场分析结果, 以设计吃水设计航速下的阻力和伴流不均匀度为优化目标, 开展船型优化设计研究。CFD 计算和船模试验结果表明:

- 1) 通过改善艏艉船体表面压力分布, 以及降低水面兴波的波幅, 优化线型相较于初始线型在阻力性能上有所改善, 有效功率降低了 2.46%;
- 2) 通过优化艏鳍, 优化线型相较于初始线型桨盘面伴流均匀度得到改善, 伴流不均匀度降低了 8.48%;
- 3) 降低桨盘面伴流不均匀度, 有利于提升船

舶的推进效率,优化线型相较于初始线型船后收到功率降低了3.49%,达到了优化目标。

参考文献:

- [1] 孙海素,陈京普,魏锦芳. 20万吨级垂直艏散货船艏部线型对阻力性能的影响研究[C]//第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源诞辰110周年纪念大会论文集(下册). 无锡:中国力学学会,2012: 440-446.
SUN H S, CHEN J P, WEI J F. Research on fore-body-plan influence on the resistance of 200000 DWT bulk carrier with upright bulb[C]//Collected Papers of the 11th National Hydrodynamics Academic Conference and the 24th National Hydrodynamics Symposium and the 110th Anniversary of Zhou Peiyuan's Birthday (Volume 2). Wuxi: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2012: 440-446 (in Chinese).
- [2] 班业平. 20万吨级绿色环保型散货船开发与设计[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2013, 36(2): 21-25, 48.
BAN Y P. The research and development of 200000 DWT class bulk carrier[J]. *Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute*, 2013, 36(2): 21-25, 48 (in Chinese).
- [3] 次洪恩,谢仲安. MARIC 20.8万吨绿色散货船设计特点[J]. 中国船检, 2014(9): 72-73.
CI H E, XIE Z A. Design features of MARIC's 208000 DWT green bulk carrier[J]. *China Ship Survey*, 2014(9): 72-73 (in Chinese).
- [4] 中国船舶及海洋工程设计研究院民船部. MARIC 第二代 20.8万吨纽卡斯尔最大型散货船[J]. 船舶, 2019, 30(6): 105-107.
Merchant Ship Department of MARIC. MARIC's second-generation 208 000 DWT Newcastle largest bulk carrier[J]. *Ship & Boat*, 2019, 30(6): 105-107 (in Chinese).
- [5] 钱建魁,毛筱菲,王孝义,等. 基于CFD和响应面方法的最小阻力船型自动优化[J]. 船舶力学, 2012, 16(1/2): 36-43.
QIAN J K, MAO X F, WANG X Y, et al. Ship hull automated optimization of minimum resistance via CFD and RSM technique[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, 16(1/2): 36-43 (in Chinese).
- [6] 陈文战,陈伟,杨向晖,等. 最小阻力的参数化船型优化研究[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(2): 28-33.
CHEN W Z, CHEN W, YANG X H, et al. Parametric hull form optimization for minimum resistance[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(2): 28-33 (in Chinese).
- [7] 邓贤辉,方昭昭,赵丙乾. 基于计算流体动力学的最小阻力船型自动优化[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(3): 19-25.
DENG X H, FANG Z Z, ZHAO B Q. Automated optimization of the ship hull form with minimum resistance based on CFD[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(3): 19-25 (in Chinese).
- [8] 周伟新,黄国富. 船舶流体动力节能技术[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2018: 57-62.
ZHOU W X, HUANG G F. Fluid Dynamic Energy Saving Technology for Ships[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2018: 57-62 (in Chinese).
- [9] 傅慧萍,陈作钢. 以伴流均匀度为目标的艏部线型优化[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(10): 1429-1433.
FU H P, CHEN Z G. Stern form optimization aimed at wake uniformity[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(10): 1429-1433 (in Chinese).
- [10] 李胜忠,倪其军,赵峰,等. 大方形系数低速船艏部线型多目标优化设计[J]. 中国造船, 2013, 54(3): 1-10.
LI S Z, NI Q J, ZHAO F, et al. Multi-objective design optimization of stern lines for full-formed ship[J]. *Ship-building of China*, 2013, 54(3): 1-10 (in Chinese).
- [11] 段菲,陈鸽,张利军,等. 基于全参数化建模的多用途船型线优化设计[J]. 船海工程, 2018, 47(5): 32-36, 41.
DUAN F, CHEN G, ZHANG L J, et al. Study on hull line optimization design of the multi-purpose vessel[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2018, 47(5): 32-36, 41 (in Chinese).
- [12] 魏斯行,马宁,顾解仲,等. 基于阻力和伴流不均匀度的多用途船型线优化[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(3): 24-28.
WEI S H, MA N, GU X C, et al. Hull optimization of multipurpose ship based on resistance and wake non-uniformity[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(3): 24-28 (in Chinese).
- [13] 初绍伟,邹早建,曲宁宁. 船后伴流场影响因素的数值研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(5): 1026-1030.
CHU S W, ZOU Z J, QU N N. Numerical study on the factors affecting wake field behind ship[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2013, 37(5): 1026-1030 (in Chinese).
- [14] VAN DER PLOEG A, HOEKSTRA M. Multi-objective optimization of a tanker afterbody using PARNASSOS[C]//12th Numerical Towing Tank Symposium. Cortona: Curran Associates Inc, 2009: 146-151.
- [15] Towing Tank Tests with a 210k DWT Bulk Carrier[R]. China Ship Scientific Research Center, 2019.