

文章编号: 1000-4882 (2022) 06-0031-13

考虑鸭尾变形的豪华邮轮水动力性能优化

董奕清, 赵伟文, 王建华*

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心 (CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要

基于自研的 OPTShip-SJTU 优化软件, 通过改变鸭尾型线, 对波浪中航行的国产 VISTA 型豪华邮轮的总阻力系数、量纲一纵摇和垂荡幅值进行了综合优化和分析。优化过程中采用自由变形、优化拉丁超立方采样方法、计算流体力学、Kriging 近似模型以及多目标遗传算法 (NSGA-II), 得到了供决策者选择的 Pareto 优化解集, 选取了 4 个优化鸭尾进行了数值模拟和验证。鸭尾两侧型线向前收缩和中部型线向后延伸, 邮轮的总阻力系数、量纲一纵摇和垂荡幅值可同时得到优化; 鸭尾向后伸展, 量纲一垂荡幅值略有增加, 总阻力系数和量纲一纵摇幅值有所降低, 纵摇和垂荡存在优化冲突。研究中采用的优化方法和流程可用于豪华邮轮水动力性能优化, 所得结论可为邮轮鸭尾型线设计提供参考。

关键词: 豪华邮轮; 鸭尾变形; 水动力性能; 多目标优化; 计算流体力学

中图分类号: U661.32

文献标志码: A

0 引 言

近年来随着我国船舶设计制造水平的提高和人们对休闲娱乐需求的增加, 豪华邮轮已成为研究的重点^[1]。在节能减排、构建绿色海洋的大背景下, 如何有效降低船舶航行阻力从而减少环境污染, 是现今船舶设计优化中需要考虑的关键因素。豪华邮轮还需要给游客提供一个安全舒适的环境, 以便更好地开展海上休闲和娱乐活动, 这就要求其在航行时拥有更好的平稳性能, 即垂荡、纵摇等运动响应较小。

为了进一步改善邮轮航行时的水动力性能以及拥有更好的安全舒适特性, 豪华邮轮的尾部通常设计成鸭尾形式, 这种鸭尾形式与常见的尾板附体的作用机理相似, 即通过改变尾部流场实现水动力性能的提升, 但是豪华邮轮采用的鸭尾不是简单的一块板, 而是沿着船体尾部向后光顺延伸的大型结构。目前与豪华邮轮鸭尾相关的研究较少, 而对尾板的研究较多, 研究方法有试验和数值模拟两类。

程明道^[2]使用均匀设计方法对高速排水型船的尾板进行了优化, 系列模型试验表明安装优化后的尾板使船舶航行阻力降低 4% 以上。纪亨腾等^[3]在关于舰船尾部改型研究的综述中提到国内某护卫舰加装鸭尾后船体的剩余阻力明显降低, 且随着鸭尾加长剩余阻力呈现减小趋势。Maki 等^[4]对加装不同形式尾板的 DTMB 5415 船型进行了模型试验和数值模拟, 发现尾板主要是通过改变尾部波形来改善船体压力分布, 使得兴波阻力减小。王艳霞等^[5]对加装不同尾板的中型豪华邮轮进行了模型试验, 分析了尾板对邮轮阻力和纵倾姿态的影响, 发现尾板倾斜角度会影响最终的减阻效果, 其中 0° 为最佳安装角。

收稿日期: 2022-01-14; 修改稿收稿日期: 2022-03-30
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51809169)

Abramowski 等^[6]基于 OpenFoam 对 B25 型渔船加装鸭尾装置前后的阻力进行了评估和优化, 渔船的总阻力可降低 9.03%, 且鸭尾抑制了渔船尾部的兴波。Kurniawati 等^[7]基于 CFD 数值模拟对某加装不同长度鸭尾的渡轮进行了评估, 发现鸭尾能使不同航速下的渡轮阻力显著降低, 且 6 m 长的鸭尾减阻效果比 3 m 长的鸭尾更好。邱永吉^[8]运用 CFD 开展了尾板对深 V 船型性能影响的研究, 尾板对于中高速深 V 船的运动响应改善不明显, 而阻力改善效果较好, 安装角 6° 的尾板比安装角 3° 尾板减阻效果更好。曹亚龙等^[9]对加装不同参数压浪板和阻流板的 M 型滑艇性能进行研究, 恰当的尾板参数可以改善滑艇的阻力与耐波性能, 其中长度 125 mm、安装角 5° 的压浪板的效果最好。孙聪等^[10]运用 STAR-CCM+ 软件对压浪板和阻流板进行了对比研究, 压浪板在弗劳德数小于 0.5 时减阻效果较好, 阻流板在弗劳德数大于 0.5 时减阻效果较好。Wang 等^[11]研究了尾压浪板对双体船在规则波中迎浪航行水动力性能的影响, 压浪板对双体船模型阻力、升沉和纵摇运动的影响在模型共振频率附近更明显, 且 160 mm 长度的尾压浪板减阻效果较好。

由以上分析可知, 加装鸭尾或尾板可在一定程度上改善阻力、耐波性等船舶水动力性能, 但不同的鸭尾或尾板形式造成的影响不同。对于豪华邮轮而言, 不同的鸭尾型线也必然会对它的水动力性能产生不同的作用, 为进一步提高其水动力性能, 有必要对鸭尾型线进行优化和分析。本文基于自研的船型优化软件 OPTShip-SJTU, 以豪华邮轮在规则波中迎浪航行时的总阻力系数、量纲一纵摇与垂荡幅值为目标, 对豪华邮轮鸭尾型线开展优化研究, 分析鸭尾型线变化对邮轮水动力性能的影响。

1 优化流程及方法

采用上海交通大学船海计算水动力学研究中心自主研发的 OPTShip-SJTU 软件对豪华邮轮的水动力性能进行优化和分析, 流程如图 1 所示。首先通过变形和采样获得拥有不同型线鸭尾的样本船, 然后采用 naoe-FOAM-SJTU 黏流求解器对各样本船的水动力性能(阻力、垂荡、纵摇)进行评估, 接着运用近似模型技术构建邮轮变形参数和水动力性能之间的映射关系, 最后在构建的近似模型上寻优, 获得优化船型并进行验证。

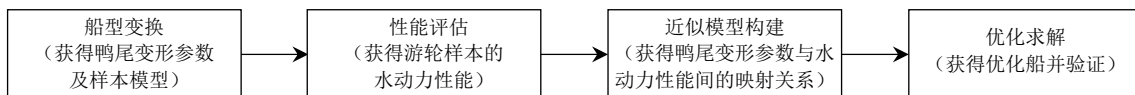


图 1 优化流程示意图

1.1 船型变换

在船型变换时需要运用变形和采样方法获得丰富的样本船, 以寻求性能更优的型线。

1.1.1 自由变形

根据豪华邮轮鸭尾局部变形的需求, 采用具有易于变形和控制严格特点的自由变形 (free-form deformation, FFD) 来实现鸭尾变形。该方法最早由 Sederberg 和 Parry^[12]提出, 首先用方框指定待变形的区域, 然后在变形方框中设置移动控制点和固定控制点, 以控制物体表面点的移动。移动控制点带动物体表面点移动使物体变形, 而固定控制点则限制物体表面点移动, 进而达到灵活变形的目的。移动控制点和物体表面点的关系用 Bernstein 多项式来表示^[1]:

$$\mathbf{X}(x', y', z') = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,l}(x') B_{j,m}(y') B_{k,n}(z') \mathbf{Q}_{i,j,k} \quad (1)$$

式中, \mathbf{X} 和 $\mathbf{Q}_{i,j,k}$ 表示物体表面点和移动控制点的全局坐标; (x', y', z') 表示物体表面点在变形方框中的局部坐标; B 表示 Bernstein 多项式, 其定义如下:

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (2)$$

当控制点 $\mathbf{Q}_{i,j,k}$ 移动至 $\mathbf{Q}'_{i,j,k}$ 时, 物体表面任意一点 (s, t, u) 随之发生移动, 新位置的坐标为

$$\mathbf{X}_{\text{ffd}} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,l}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) \mathbf{Q}'_{i,j,k} \quad (3)$$

物体最终产生的变形效果如图 2 所示。

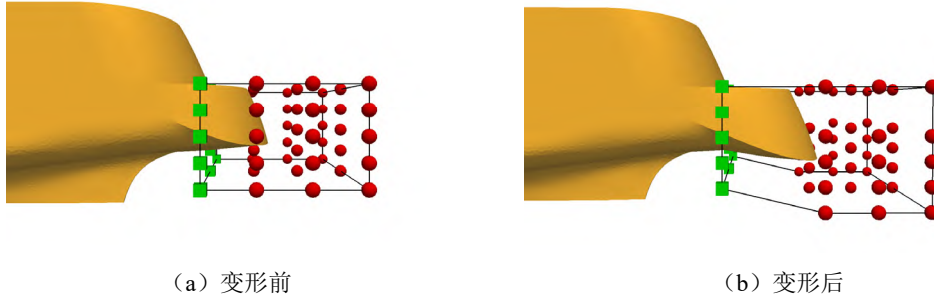


图 2 自由变形示意图

1.1.2 采样

当前有多种采样方法可供选择, 如正交试验 (OES)、拉丁超立方 (LHS)、优化拉丁超立方 (OLHS)、均匀试验 (UES)、Sobol 方采样等^[13]。本文选用优化拉丁超立方进行采样, 以获得用于鸭尾变形的批量变形参数。优化拉丁超立方在拉丁超立方采样方法基础上进行了改进, 分为确定初始样本点集和优化拉丁方矩阵两部分^[14], 先对随机拉丁方矩阵进行 Cholesky 分解, 得到具有较好正交性的初始样本点集, 再以最小化最大列相关系数 ρ_{\max} 和最大化最小距离准则 φ_p 为目标对第一部分中获得的初始样本点集进行优化, 样本点集的正交性和均匀性得到进一步改善。最大列相关系数 ρ_{\max} ^[14] 表示最极端的两列相关性, 体现样本点的非正交性, 计算公式如下:

$$\rho_{\max} = \max_{i \neq j} \left(\frac{\left| \sum_{b=1}^n ((x_b^i - \bar{x}^i)(x_b^j - \bar{x}^j)) \right|}{\sqrt{\sum_{b=1}^n (x_b^i - \bar{x}^i)^2 \sum_{b=1}^n (x_b^j - \bar{x}^j)^2}} \right) \quad (4)$$

最小距离准则 φ_p ^[14] 体现样本点的均匀性, 定义如下:

$$\varphi_p = \min \left(\sum_{i=1}^s J_i d_i^{-p} \right)^{1/p} \quad (5)$$

式中, d_i 表示不同样本点间的距离, J_i 表示满足距离为 d_i 的样本点的数量, s 表示不同距离值的数量, p 通常取值为 2。

1.2 性能评估

采用黏流求解器 naoe-FOAM-SJTU 对豪华邮轮的水动力性能进行数值评估, 求解器将不可压缩 RANS 方程^[15]作为控制方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{\text{eff}} + \mathbf{f}_\sigma + \mathbf{f}_s \quad (7)$$

式中, \mathbf{U} 为速度场; \mathbf{U}_g 为网格节点速度; ρ 为流体密度; \mathbf{g} 为重力加速度; p_d 为动压力场; μ_{eff} 为有

效动力黏性系数, 大小为 $\rho(v+v_t)$; ν 为运动黏性系数; ν_t 为涡黏系数, 由 SST $k-\omega$ 湍流模型得到; f_s 是用于消波区的源项; f_σ 是两相流模型中的表面张力项。

求解器采用带有人工压缩项 ($\nabla \cdot (U_r(1-\alpha)\alpha)$) 的流体体积法 (VOF) 来实现自由液面的捕捉, VOF 输运方程^[16]定义为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(U - U_g)\alpha) + \nabla \cdot (U_r(1-\alpha)\alpha) = 0 \quad (8)$$

式中, α 表示体积分数, 其值为 0 时代表空气, 值为 1 时代表水, 在 0 ~ 1 之间表示自由液面; U_r 表示压缩界面速度场。

可通过 6 自由度运动方程求解船舶运动姿态, 首先根据作用在船体上的力求解对应的线加速度和角加速度:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= X/m + vr - wq + x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q}) - C_1u/m \\ \dot{v} &= Y/m + wp - ur + y_g(r^2 + p^2) - z_g(qr - \dot{p}) - x_g(qp + \dot{r}) - C_2v/m \\ \dot{w} &= Z/m + uq - vp + z_g(p^2 + q^2) - x_g(rp - \dot{q}) - y_g(rp + \dot{p}) - C_3w/m \\ \dot{p} &= \frac{1}{I_x} \left(K - (I_z - I_y)qr - m(y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)) - C_4p \right) \\ \dot{q} &= \frac{1}{I_y} \left(M - (I_x - I_z)rp - m(z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)) - C_5q \right) \\ \dot{r} &= \frac{1}{I_z} \left(N - (I_y - I_x)pq - m(x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)) - C_6r \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, m 表示船舶的质量; I_x , I_y , I_z 表示船舶的主转动惯量; K , M , N 表示船舶受到的力矩; u , v , w 表示船舶的线速度; p , q , r 表示船舶的角速度; x_g , y_g , z_g 表示船舶的重心位置。

在获得加速度后, 对其积分得到在船体坐标系中的速度, 通过坐标变换转换为大地坐标系中的速度, 再进行积分获得船体的位移。

1.3 近似模型构建

在获得各样本船的变形参数和水动力性能后, 可建立近似模型获得邮轮鸭尾变形参数 (设计变量) 和邮轮水动力性能 (优化目标) 之间的映射关系, 在优化过程中用它们近似替代 CFD 数值评估, 可在减少计算成本和时间的同时获得性能更优的解。

构建近似模型的方法有多项式响应面 (RSM)、克里金模型 (KRG)、径向基函数 (RBF)、神经网络 (ANN)、支持向量机 (SVM) 等。本文选择具有良好适应性且可有效近似复杂非线性函数的克里金近似模型来构建变形参数和水动力性能之间的映射关系。克里金近似模型是一种以结构分析和变异函数为基础进行无偏、最优估计的半参数化插值模型^[17], 分为多项式回归和随机分布两部分, 可写成如下形式:

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^k \beta_i f_i(\mathbf{x}) + \varepsilon(\mathbf{x}) \quad (10)$$

式中, β_i 表示回归参数, $f_i(\mathbf{x})$ 表示基函数, 两者共同构成了多项式回归部分, 是对模型的全局近似; $\varepsilon(\mathbf{x})$ 表示随机分布的误差, 是对模型局部偏差的近似, 并且满足均值为零、协方差不为零的统计特性。协方差的定义如下:

$$\text{Cov}(\varepsilon(\mathbf{x}^{(i)}), \varepsilon(\mathbf{x}^{(j)})) = \sigma^2 R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)}) \quad (11)$$

$$R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)}) = \exp\left(-\sum_{h=1}^k \theta_h |x_h^{(i)} - x_h^{(j)}|^{p_h}\right) \quad \theta_h \geq 0, p_h \in [1, 2] \quad (12)$$

式中, \mathbf{R} 表示相关性矩阵, σ^2 表示高斯函数的方差, $R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})$ 表示两点之间的相关函数 (本文采用高斯相关性函数)。

1.4 优化求解

为获得性能更优的解还需要使用优化算法在所构建的近似模型中寻优。研究中采用 NSGA-II 多目标遗传算法求优化解。该算法引入了精英策略^[18], 在迭代过程中把父代与子代种群合并在一起, 可避免进化过程中优秀个体的丢失, 使得优化算法的精度提高。在算法中还添加了拥挤度计算, 明确给定个体周围的群体密度, 以消除人为设定共享参数所产生的弊端, 通过非支配排序和拥挤度使 Pareto 域中有合适的个体分布, 使种群的多样性得到保障。

2 优化问题建立及实现

2.1 优化问题建立

以模型尺度的国产 VISTA 型豪华邮轮为优化对象, 其三维模型和主要参数如图 3 和表 1 所示。



图 3 VISTA 型豪华邮轮

表 1 豪华邮轮模型的主要参数

参数	水线长 L_{wl}/m	垂线间长 L_{pp}/m	型宽 B/m	设计吃水 T/m	湿表面积 S/m^2
数值	7.458	7.177	0.932	0.206	8.081

针对豪华邮轮以最大航速 ($Fr = 0.209$) 和设计吃水在规则波中迎浪航行的工况, 进行基于鸭尾变形的水动力性能优化。其中波高为 0.05 m , 波长为水线长的 1 倍。设定了 3 个优化目标, 即波浪中航行的总阻力系数、量纲一纵摇幅值及量纲一垂荡幅值, 优化问题可以用下式来表示:

$$\begin{aligned}
 f_{\text{obj1}}(V_1, V_2, V_3) &= \min C_T \\
 f_{\text{obj2}}(V_1, V_2, V_3) &= \min \theta' \\
 f_{\text{obj3}}(V_1, V_2, V_3) &= \min Z' \\
 (V_1, V_2, V_3) &\in D
 \end{aligned} \tag{13}$$

式中, V_1 、 V_2 、 V_3 表示变形参数, D 表示该优化的可行域, 取为鸭尾变形的设计空间, 在可行域中的每个可行点都对应 1 组变形参数。 C_T 为豪华邮轮在波浪中航行的总阻力系数, θ' 为量纲一纵摇幅值, Z' 为量纲一垂荡幅值, 计算公式如下:

$$C_T = \frac{R_T}{0.5\rho S V^2} \tag{14}$$

$$\theta' = \frac{\theta}{\zeta_s k} \tag{15}$$

$$Z' = \frac{Z}{\zeta_s} \tag{16}$$

式中, R_T 表示邮轮的总阻力 (波浪中取一个遭遇周期内的平均值), S 表示邮轮的湿表面积, V 表示邮轮的航速, ζ_s 表示波幅, k 表示波数。

2.2 鸭尾变形

依据自由变形方法建立变形方框来实现鸭尾变形, 并使其包含邮轮全部鸭尾区域。变形方框中设定了一系列的移动控制点和固定控制点, 在保证鸭尾型线光顺的同时控制鸭尾纵向长度、横向收缩速率、倾斜角度等特征。变形方框的布置及控制点的分布如图 4 所示, 整个方框中均匀分布了 60 个控制点, 其中固定控制点使用方框显示, 移动控制点使用圆点显示。移动控制点需要给定相应的移动方向和变化范围, 用变形参数 V_1 、 V_2 、 V_3 来确定移动控制点在船长、船宽和吃水方向上的变化, 变化范围如表 2 所示, 其中变形参数的取值用邮轮水线长进行量纲一处理。

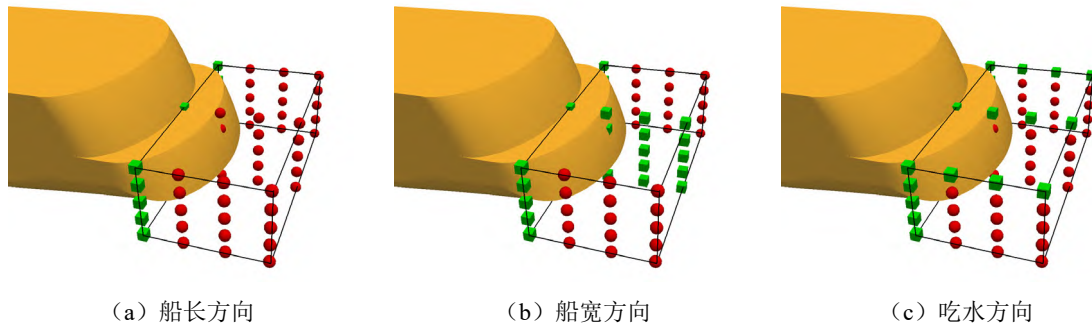


图 4 变形方框及控制点

表 2 变形参数变化范围

变形参数	量纲一表示式	量纲一位移变化范围	移动控制点位移方向
V_1	$\Delta x/L_{wl}$	$[-0.020,0]$	船长方向
V_2	$\Delta y/L_{wl}$	$[0,0.040]$	船宽方向
V_3	$\Delta z/L_{wl}$	$[-0.008,0]$	吃水方向

针对豪华邮轮鸭尾变形参数的变化范围(设计空间)使用优化拉丁超立方进行采样, 共获取 24 组变形参数, 变形参数取值及其在设计空间中的分布如图 5 所示, 获得的样本点具有较好的均匀性和正交性。依据获得的变形参数对豪华邮轮的鸭尾进行自由变形, 可获得 24 个具有不同型线鸭尾的样本船。

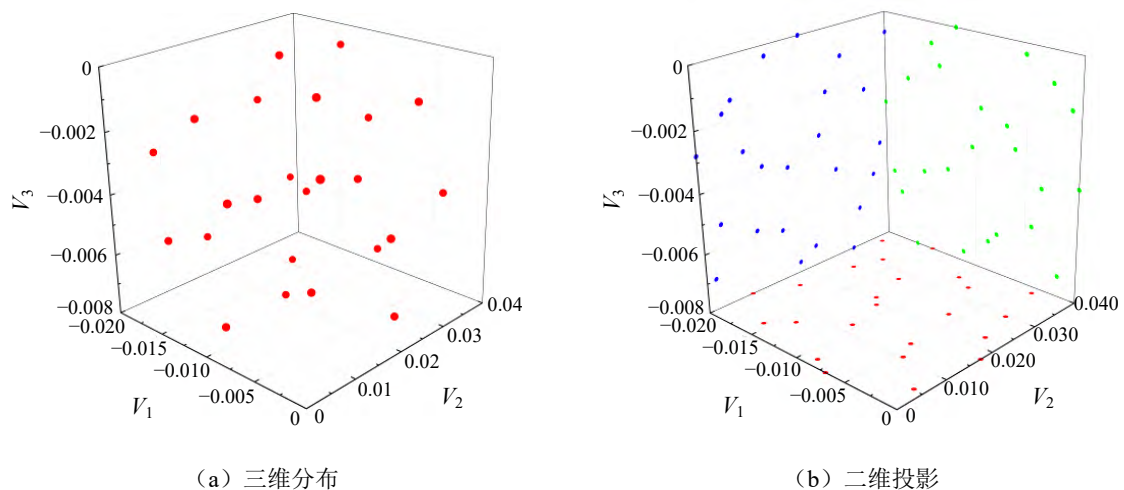


图 5 变形参数在设计空间的分布

2.3 水动力性能评估及验证

使用 naoe-FOAM-SJTU 黏流求解器开展豪华邮轮在波浪中运动时的水动力性能计算, 该求解器的计算精度和可靠性已经通过 KCS、DTMB 等标模计算得到验证^[16,19-22]。由于计算对象是左右对称的,

为减少计算成本、提高计算效率, 计算中采用对称模型。计算域和边界条件设定如图 6 所示, 计算域范围为: $-L_{wl} < x < 4L_{wl}$; $0 < y < L_{wl}$; $-L_{wl} < z < 0.5L_{wl}$ 。

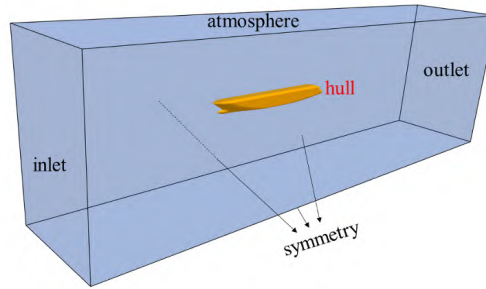


图 6 计算域和边界条件

在开展水动力性能评估之前, 依据ITTC推荐的CFD数值计算验证和确认方法进行了计算可靠性验证^[15]。为了能够精确捕获船体周围的自由液面, 在邮轮及自由液面附近都进行了局部网格加密, 并按照 $\sqrt{2}$ 的网格加密比值生成密网格、中等网格和粗网格 3 套网格, 编号分别为 1、2、3。3 套网格的参数及计算得到的总阻力系数 C_T 、量纲一纵摇幅值 θ' 和量纲一垂荡幅值 Z' 如表 3 所示, 总阻力系数为邮轮在一个波浪遭遇周期内的平均值。可以看到: 随着计算网格的加密, 总阻力系数、量纲一纵摇幅值、量纲一垂荡幅值是收敛的, 中等网格和细网格间的计算差异在2%以内, 即网格密度达到中等程度后, 计算结果的变化已较小。

表 3 不同网格的参数和计算结果

网格编号	背景网格数	网格总数/ 10^4	$C_T/10^{-3}$	θ'	Z'
1	57×11×170	541.3	3.738	0.402	0.372
2	40×8×120	251.5	3.637	0.381	0.353
3	27×6×84	89.6	3.266	0.287	0.261

由于需要开展大批量变形船的 CFD 数值计算, 以中等密度的网格 (编号2) 为基础, 采用 naoe-FOAM-SJTU 黏流求解器对拥有不同鸭尾型线的 24 个样本邮轮的水动力性能进行计算, 计算结果如表 4 所示。

表 4 样本船变形参数及水动力性能

样本船编号	变形参数			水动力性能		
	V_1	V_2	V_3	$C_T/10^{-3}$	θ'	Z'
1	-0.017 4	0.026 1	-0.002 1	3.598	0.373	0.356
2	-0.018 3	0.015 7	-0.006 3	3.679	0.362	0.358
3	-0.013 9	0.007 0	-0.001 4	3.597	0.369	0.357
4	-0.007 0	0.000 0	-0.002 8	3.608	0.370	0.357
5	-0.007 8	0.033 0	-0.006 6	3.702	0.378	0.353
6	-0.003 5	0.038 3	-0.004 5	3.669	0.387	0.350
7	-0.006 1	0.024 3	-0.003 5	3.623	0.378	0.353
8	-0.015 7	0.003 5	-0.005 2	3.656	0.360	0.360
9	-0.020 0	0.008 7	-0.003 1	3.607	0.362	0.360
10	-0.000 9	0.005 2	-0.001 7	3.610	0.378	0.354

表 4 续 样本船变形参数及水动力性能

样本船编号	变形参数			水动力性能		
	V_1	V_2	V_3	$C_T/10^{-3}$	θ'	Z'
11	-0.013 0	0.027 8	-0.004 9	3.647	0.374	0.355
12	-0.004 3	0.010 4	-0.005 9	3.681	0.370	0.356
13	-0.010 4	0.012 2	-0.003 8	3.632	0.370	0.356
14	-0.019 1	0.036 5	-0.005 6	3.654	0.372	0.354
15	0.000 0	0.017 4	-0.004 2	3.648	0.380	0.353
16	-0.014 8	0.040 0	-0.000 7	3.628	0.383	0.352
17	-0.012 2	0.020 9	0.000 0	3.603	0.377	0.354
18	-0.011 3	0.019 1	-0.007 7	3.745	0.367	0.356
19	-0.008 7	0.001 7	-0.007 0	3.739	0.362	0.358
20	-0.009 6	0.034 8	-0.002 4	3.640	0.382	0.352
21	-0.016 5	0.031 3	-0.008 0	3.737	0.369	0.355
22	-0.001 7	0.022 6	-0.007 3	3.728	0.376	0.353
23	-0.002 6	0.029 6	-0.001 0	3.651	0.387	0.350
24	-0.005 2	0.013 9	-0.000 3	3.616	0.380	0.353

2.4 近似模型构建及精度检验

为确保所构建近似模型的精度,采用留一交叉验证法对各近似模型进行精度检验,即对母型船和 24 个变形船所构成的样本库,每次选取 1 个样本作为验证点,而剩余的样本用于构建近似模型,依次遍历所有样本点,每个样本点都可以作为验证点并获得相对应的近似模型预测值。3 个水动力性能所对应的克里金近似模型的交叉验证结果如图 7 所示,图中横坐标为 CFD 计算结果,纵坐标为所构建的近似模型的预测结果,斜线表示计算结果和近似模型预测结果相等,图中的点为每个样本的验证结果,位置越靠近斜线表明建立的克里金近似模型的精度越高。可以看出,量纲一纵摇幅值的近似模型预测精度最高,交叉验证点几乎与斜线重合,总阻力系数和垂荡幅值的近似模型预测精度比纵摇幅值的近似模型预测精度略低,但交叉验证点也在斜线附近。3 个水动力性能优化结果所对应的克里金近似模型都取得了较好的预测精度,可以用来替代 CFD 计算,进行豪华邮轮的水动力性能预测评估。

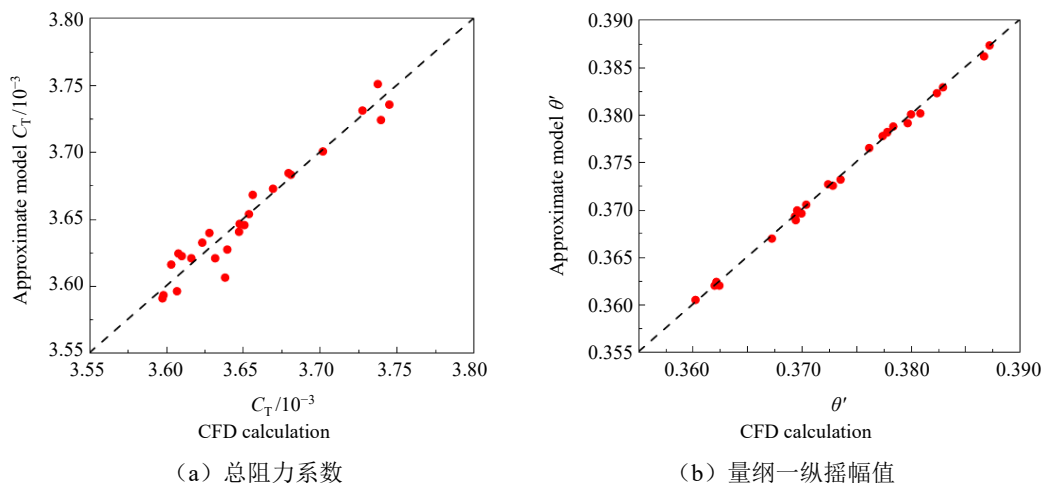
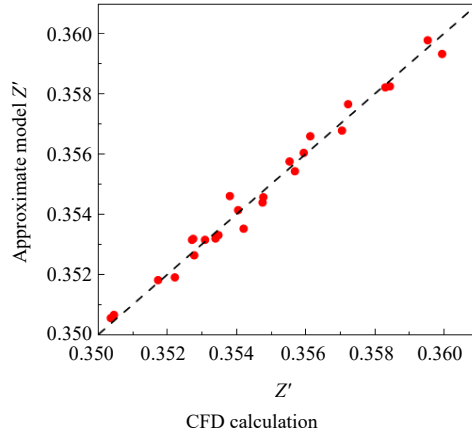


图 7 克里金近似模型留一交叉验证结果



(c) 量纲一垂荡幅值

图 7 续 克里金近似模型留一交叉验证结果

2.5 寻优

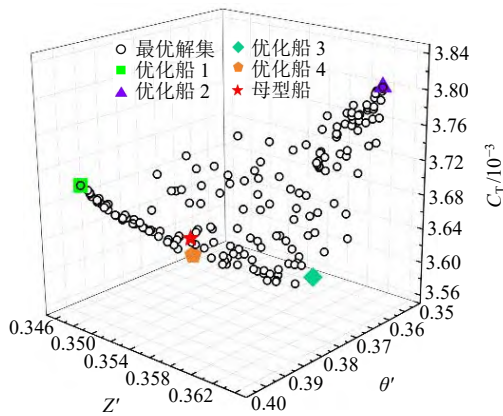
采用 NSGA-II 优化算法在构建的近似模型上进行多目标寻优, 寻优算法的相关参数如表 5 所示。

表 5 NSGA-II 优化算法参数

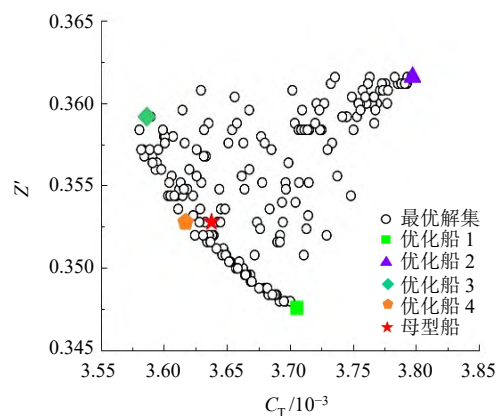
参数	每代种群个体数	迭代次数	最优种群个数比例	交叉概率	变异概率
数值	200	500	0.9	0.8	0.2

寻优获得的 Pareto 最优解集的三维空间及二维投影如图 8 所示, 从解集分布来看, 豪华邮轮的总阻力系数、量纲一纵摇和垂荡幅值无法同时实现最优, 其中量纲一纵摇和垂荡幅值呈现出明显的负相关, 即一个性能实现优化, 另一个性能可能变差, 总阻力系数和量纲一纵摇幅值在一定范围内存在正相关。

为确保寻优结果的准确性, 并分析鸭尾型线对豪华邮轮水动力性能和尾部流场的影响, 在 Pareto 最优解集中选取了 4 个优化船型, 并利用 naoe-FOAM-SJTU 黏流求解器进行数值计算。优化船 1、2、3 分别对应于量纲一垂荡幅值、量纲一纵摇幅值和总阻力系数取得了较好优化效果的船型, 优化船 4 为 3 个水动力性能同时优于母型船的船型。

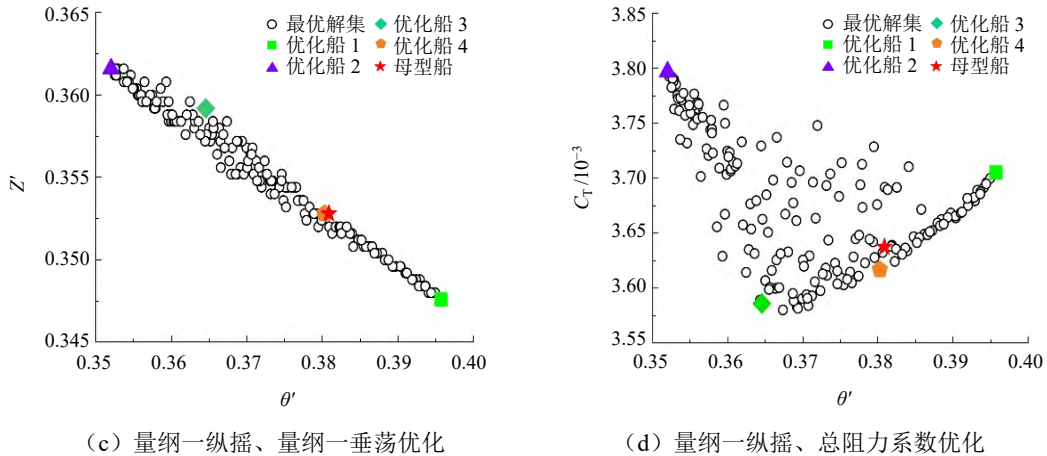


(a) 总阻力系数、量纲一垂荡、量纲一纵摇优化



(b) 总阻力系数、量纲一垂荡优化

图 8 Pareto 最优解集空间分布



(c) 量纲一纵摇、量纲一垂荡优化

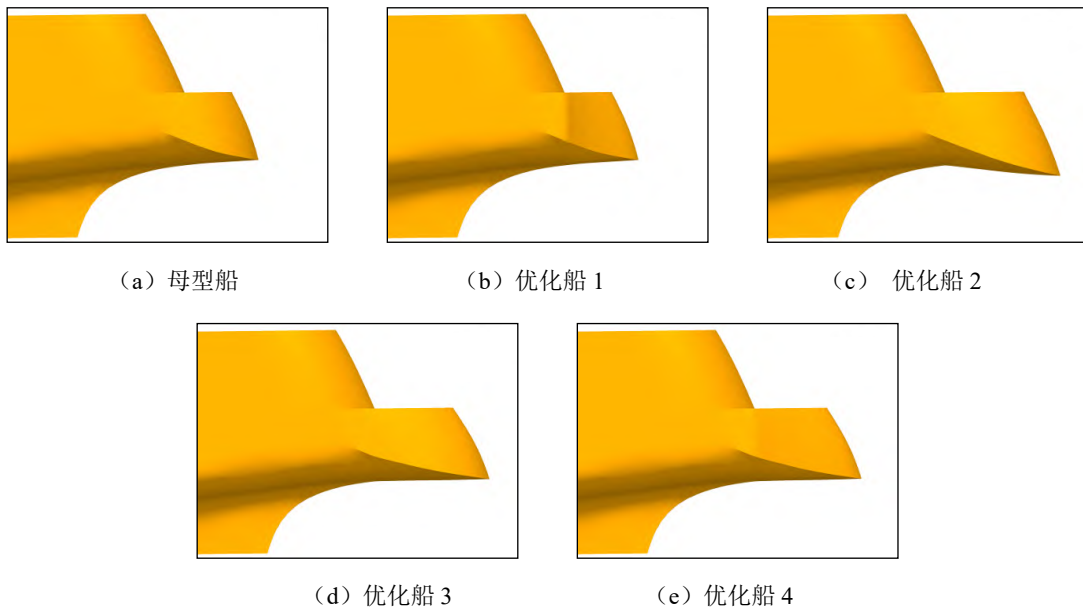
(d) 量纲一纵摇、总阻力系数优化

图 8 续 Pareto 最优解集空间分布

3 优化结果验证及分析

3.1 鸭尾型线

图 9 给出了豪华邮轮鸭尾原型和 4 个优化船型鸭尾的三维模型，相比于原型船鸭尾，优化船 1 鸭尾向中纵剖面 and 船首方向收缩，优化船 2 鸭尾向后方和两侧伸展并有较大的下倾角度，优化船 3 鸭尾只向后方和两侧伸展，优化船 4 鸭尾两侧向船艏方向收缩，靠近中纵剖面部分则向后方伸展。



(a) 母型船

(b) 优化船 1

(c) 优化船 2

(d) 优化船 3

(e) 优化船 4

图 9 母型船与优化船鸭尾

3.2 水动力性能

表 6 给出了 4 个优化船水动力性能的克里金近似模型预测结果及 CFD 计算结果的对比，表 7 给出了各优化船型的优化效果，近似模型的预测误差在 0.1% 左右，实现了较高的预测精度。优化船 1 的垂荡性能改善了 1.61%，但阻力和纵摇性能有所下降；优化船 2 的纵摇性能大幅改善（量纲一纵摇幅值降低 7.47%），但总阻力和垂荡性能恶化；优化船 3 的垂荡性能略有恶化，而总阻力及纵摇性能分别改善 1.37% 和 4.40%；优化船 4 的总阻力、纵摇和垂荡 3 个性能同时得到了改善，由于性能优化之间存在矛盾，优化幅度不高，分别为 0.57%、0.18% 和 0.10%。

从优化船鸭尾型线及水动力性能改善效果来看, 鸭尾向中纵剖面 and 船首方向收缩有助于邮轮垂荡性能的改善, 而鸭尾向两侧和后方伸展有利于总阻力性能和纵摇性能的改善, 当鸭尾有较大的向下倾斜角度时, 可以大幅度改善邮轮的纵摇性能, 但邮轮的总阻力性能下降。

表 6 近似模型预测及CFD计算结果对比

类型	变形参数			预测结果			CFD 计算结果		
	V_1	V_2	V_3	$C_T/10^{-3}$	θ'	Z'	$C_T/10^{-3}$	θ'	Z'
母型船	—	—	—	—	—	—	3.637	0.381	0.353
优化船 1	0.000 0	0.039 9	0.000 0	3.705	0.396	0.348	3.672	0.395	0.347
优化船 2	-0.020 0	0.000 1	-0.008 0	3.797	0.352	0.362	3.802	0.352	0.361
优化船 3	-0.019 6	0.008 3	-0.001 8	3.586	0.365	0.359	3.587	0.364	0.359
优化船 4	-0.01 58	0.038 3	-0.001 6	3.617	0.380	0.353	3.617	0.380	0.352

表 7 优化效果

单位: %

类型	C_T	θ'	Z'
优化船 1	0.94	3.75	-1.61
优化船 2	4.52	-7.47	2.24
优化船 3	-1.37	-4.40	1.67
优化船 4	-0.57	-0.18	-0.10

为进一步分析鸭尾型线对邮轮阻力的影响, 将邮轮总阻力系数分解为黏压阻力系数 C_p 和摩擦阻力系数 C_f , 如表 8 所示。鸭尾型线变化引起黏压阻力系数的大幅度变化, 鸭尾主要通过降低邮轮的黏压阻力来实现总阻力优化, 虽然鸭尾向后伸展会引起摩擦阻力系数的增加, 但当黏压阻力降低值超过摩擦阻力增加值时, 总阻力就会降低。若采用较好的鸭尾型线, 总阻力系数可降低 1.37%。

表 8 各船型阻力分量及优化效果

类型	CFD 计算			优化效果/ %		
	$C_p/10^{-3}$	$C_f/10^{-3}$	$C_T/10^{-3}$	C_p	C_f	C_T
母型船	0.906	2.732	3.637	—	—	—
优化船 1	0.895	2.777	3.672	-1.18	1.65	0.94
优化船 2	1.004	2.798	3.802	10.89	2.41	4.52
优化船 3	0.793	2.794	3.587	-12.40	2.28	-1.37
优化船 4	0.832	2.785	3.617	-8.16	1.94	-0.57

4 结 论

本文以波浪中航行的豪华邮轮的总阻力系数、量纲一纵摇及垂荡幅值为目标, 采用船型变换、CFD 数值评估、近似模型建模以及优化算法对鸭尾型线进行优化, 获得相应的 Pareto 最优解集, 并从中选取了 4 个优化鸭尾船型进行数值模拟和验证, 分析了鸭尾型线变化对邮轮水动力性能的影响。

豪华邮轮鸭尾向后伸展有助于改善邮轮总阻力和纵摇性能, 若同时向下大幅度倾斜还可以进一步降低邮轮纵摇幅值, 但会使总阻力增大; 鸭尾向中纵剖面 and 船首方向收缩有助于改善邮轮垂荡性能,

但这与鸭尾后伸改善阻力和纵摇性能产生冲突,从而导致了3个目标同时优化时各目标改善的幅度较低,也使得3个目标同时改善的鸭尾型线呈现出两侧向船首方向收缩、靠近中纵剖面部分向后方伸展。

本文采用的邮轮鸭尾型线优化方法和流程可以实现其总阻力系数、量纲一纵摇及垂荡幅值的综合优化,可用于邮轮鸭尾型线的优化设计,也可为其它船型的综合性能优化提供借鉴。

致 谢

本文工作得到国家重点研发计划(2019YFB1704205)船体型线智能化设计技术研究、中型邮轮总体设计技术研究项目及国家自然科学基金项目(51809169)的资助。

参 考 文 献

- [1] 刘鑫旺,万德成. 豪华邮轮多航速兴波阻力的船型优化[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(5): 1-10+40.
- [2] 程明道. 均匀设计在尾压浪板设计中的应用[J]. 中国造船, 1999, 40(2): 9-14.
- [3] 纪亨腾,陈加荣,李为. 舰船尾部改型的几种措施[J]. 中国舰船研究, 2006, 1(3):41-46.
- [4] MAKI A, ARAI J, TSUTSUMOTO T, et al. Fundamental research on resistance reduction of surface combatants due to stern flaps[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2016, 21(2): 344-358.
- [5] 王艳霞,彭必业,赵强. 尾板对中型豪华邮轮阻力影响的试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017, 32(6): 725-731.
- [6] ABRAMOWSKI T, SUGALSKI K. Energy saving procedures for fishing vessels by means of numerical optimization of hull resistance[J]. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, 2017, 49(121): 19-27.
- [7] KURNIAWATI F D, UTAMA I. An Investigation into the use of ducktail at transom stern to reduce total ship resistance[J]. IPTEK Journal of Proceedings Series, 2017, 3(2):181-185.
- [8] 邱永吉. T型翼和尾压浪板对深V船型减纵摇影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [9] 曹亚龙,易文海,高志亮. 压浪板与阻流板对M型滑行艇迎浪运动的影响[C]//第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集(下册), 2019, 273-289.
- [10] 孙聪,宋科委,尹晓辉,等. 两种尾部附体在过渡型船舶上的对比研究[J]. 中国造船, 2019, 60(1): 30-39.
- [11] WANG Xiaozhou, LIU Liwei, ZHANG Zhigui, et al. Numerical study of the stern flap effect on catamaran's seakeeping characteristic in regular head waves[J]. Ocean Engineering, 2020, 206: 107172.
- [12] SEDERBERG T W, PARRY S R. Free-form deformation of solid geometric models[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1986, 20(4): 151-160.
- [13] 万德成,缪爱琴,赵敏. 基于水动力性能优化的船型设计研究进展[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2019, 34(6): 693-712.
- [14] 刘晓路,陈英武,荆显荣,等. 优化拉丁方试验设计方法及其应用[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(5): 73-77.
- [15] 王建华. 基于重叠网格技术的船舶操纵运动直接数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [16] 郭浩,王建华,万德成. 不同波长下KCS船运动响应与波浪增阻数值研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(6): 11-23.
- [17] FORRESTER A I J, KEANE A J. Recent advances in surrogate-based optimization[J]. Progress in aerospace sciences, 2009, 45(1-3): 50-79.
- [18] 陈泰文. 基于OPTShip-SJTU的面向快速性的船型优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [19] 查若思. 单体船和双体船波浪增阻的数值计算分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [20] 万德成,王建华,赵伟文. naoe-FOAM-SJTU求解器在船舶水动力性能数值预报中的应用[M]//力学与工程-新时代工程技术发展与力学前沿研究, 上海: 上海科学技术出版社, 2019, 437-453.

- [21] MIAO Aiqin, ZHAO Min, WAN Decheng. CFD-based multi-objective optimisation of S60 catamaran considering demihull shape and separation[J]. Applied Ocean Research, 2020, 97: 102071.
- [22] LIU Winwang, ZHAO Weiwen, WAN Decheng. Multi-fidelity Co-Kriging surrogate model for ship hull form optimization[J]. Ocean Engineering, 2022, 243: 110239.

Hydrodynamic Performance Optimization for Luxury Cruise Ship Considering Ducktail Deformation

DONG Yiqing, ZHAO Weiwen, WANG Jianhua*

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture,
Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

Based on the self-developed OPTShip-SJTU optimization software, this paper presents a comprehensive optimization and analysis of the total resistance coefficient, non-dimensional pitch and heave of a domestic VISTA luxury cruise ship sailing in waves by changing the ducktail profile. Free-form deformation, optimal Latin hypercube sampling method, computational fluid dynamics, Kriging approximation model and non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) were used in the optimization to obtain the Pareto-optimal solution set. Four optimized ducktails were selected for numerical simulation and validation. With the forward contraction of both sides of the ducktail and the backward extension in the middle, the total resistance coefficient, non-dimensional pitch and heave of the cruise ship can be optimized simultaneously. When the ducktail extends backward, the non-dimensional heave increases slightly, but the total resistance coefficient and the non-dimensional amplitude of pitch motion decrease, which has certain conflict between the optimization of heave and pitch. The method and procedure adopted in the study can be used in the hydrodynamic performance optimization of luxury cruise ships, and the conclusions can provide a reference to the optimization and design of the ducktail of cruise ships.

Key words: luxury cruise ships; ducktail deformation; hydrodynamic performance; multi objective optimization; computational fluid dynamics

作者简介

董奕清 男, 1999 年生, 硕士研究生。主要从事船舶与海洋结构物综合水动力性能优化方面研究。

赵伟文 男, 1990 年生, 助理研究员。主要从事船舶与海洋工程计算水动力学方面研究。

王建华 男, 1988 年生, 助理研究员, 硕士研究生导师。主要从事船舶计算水动力学、波浪中船舶操纵、船型优化、船舶精细化流场仿真方法和模拟应用等方面研究。

*通讯作者: 王建华