

文章编号: 1000-4882 (2022) 02-0116-10

基于 CFD 数值模拟和模型试验的三体船 片体位置优化

刘志强, 刘鑫旺, 万德成*

(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

论文采用低精度 CFD 数值计算和高精度模型试验相结合的方法, 以总阻力为目标, 对 $Fr=0.27$ 速度工况下的某型三体船的片体位置进行优化。利用拖曳水池对不同片体位置的三体船进行模型试验, 获得三体船在不同片体位置下的总阻力性能。使用自主开发的 CFD 黏流数值求解器 naoe-FOAM-SJTU 对一定范围内的其他片体位置进行水动力数值计算。根据模型试验和数值计算结果, 使用自主开发的船型优化软件 OPTShip-SJTU 对三体船的片体位置进行优化。通过模型试验与数值方法相结合的方式构建 Co-Kriging 近似模型, 并使所构建的模型融合模型试验的信息, 以保证优化结果的可靠性。结果显示, 沿船长方向不同的片体位置对三体船总阻力的影响有着明显的变化规律。

关键词: 三体船; 片体优化; 数值模拟; naoe-FOAM-SJTU; Co-Kriging; OPTShip-SJTU

中图分类号: U662.2

文献标志码: A

0 引 言

三体船作为一种新型水面舰艇形式以其独特的快速性和稳定性在军事领域逐渐受到广泛关注。三体船的航行优势主要体现在高航速上。英国及美国的三体船试验数据显示, 与其它水面舰艇型式相比, 三体船的船体兴波阻力更小, 从而提高战舰的最大航速, 并能够较好地兼顾甲板空间和快速性能。研究表明, 多体船在某种程度上具有高适航性, 与单体船相比, 三体船具有两侧摆动较小的优点, 作为武器运载平台具有较高的稳度, 扩展了其使用设备和武器的能力。与规模相当的单体舰船相比, 它在速度和燃油效率方面要高出至少20%^[1]。

国内在三体船性能优化方面, 众多学者做了相应的研究。刘鑫旺等^[2]以某三体船为研究对象, 使用自主开发的船型优化软件以总阻力系数为优化目标对三体船的片体位置进行优化, 采用势流求解软件 NMSHIP-SJTU 结合 ITTC 公式计算三体船的总阻力系数, 最终优化的船体总阻力相较于母型船减小了44%。李乐宇等^[3]为研究三体船片体在主船体航行波中的位置与船体阻力的关系, 通过主、片体间的兴波干扰寻找使全船阻力较小的片体排布范围以降低仿真优化的工作量和计算成本。通过数值仿真发现, 在设定航速下将三体船片体首部排布于主船体单独兴波的波谷位置, 尤其是波谷前侧位置可以获得较小的静水阻力。张英晟等^[4]采用黏流数值模拟方法计算了高速三体船在 8 种片体位置布置状

收稿日期: 2021-10-10; 修改稿收稿日期: 2022-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52131102, 51879159)、国家重点研发计划项目(2019YFB1704200, 2019YFC0312400)

态下的阻力性能,并从波高分布、兴波干扰、船体压力分布和阻力 4 个方面对计算结果进行分析,研究了三体船的片体位置对船体阻力性能的影响。Wang 等^[5]使用势流方法以兴波阻力为优化目标对三体船片体位置进行优化,提出了一种三体船片体的快速优化方法,相较于传统的枚举法有更高的计算效率。使用提出的快速优化方法对三体船主体型线、片体型线和位置进行变化,以总阻力系数为优化目标,最终得到的优化阻力与原型船的阻力相比降幅达 21.34%。

在国外相关三体船的研究方面, Nazemian 等^[6-9]在近几年中使用势流方法、黏流方法以及伴随求解技术,以总阻力、耐波性为优化目标,对三体船主体型线、片体型线和片体位置进行了数值优化研究,优化效果明显。Askarian 等^[10]通过模型试验对具有 3 种不同片体的三体船总阻力变化进行了试验研究,结果表明,片体位置在沿船长方向上向船首移动时,总阻力系数呈现下降趋势。Kursetgjerde^[11]使用数值方法对某作业型三体船的水动力性能进行了研究,以总阻力为优化目标,寻求最小阻力下的片体位置布局,最终优化后的总阻力降低了 3.2%。

为提高优化效率,同时保证三体船近似模型在构建过程中能融合物理实际信息,本文使用 Co-Kriging 理论构建多精度近似模型从而提高近似模型的可信度与可靠性,并以某典型三体船为研究对象,以 $Fr = 0.27$ 下的三体船总阻力系数为优化目标,对三体船片体的布置进行优化。使用低精度 CFD (computational fluid dynamics) 数值模拟结果和高精度模型试验结果作为近似模型构建的数据支撑,使用 Co-Kriging 理论提取两种数据集集中的信息构建多精度 Co-Kriging 近似模型,使用单目标遗传算法进行极值寻优,最终得到 Co-Kriging 理论下的三体船最小阻力以及最优片体布局。

1 优化软件及相关优化方法

1.1 优化软件的流程及模块

本文基于自主开发的船型优化软件 OPTShip-SJTU 开展三体船片体优化工作。软件流程框架如图 1 所示。

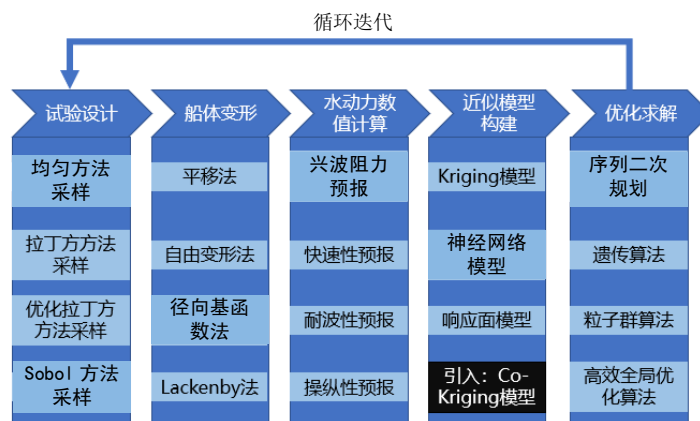


图 1 OPTShip-SJTU 软件框图

软件主要包含 5 个模块:

(1) 试验设计模块: 根据实际优化需求确定变形参数的设计空间边界,采用试验采样方法对设计空间进行采样,以满足用最少的数值仿真次数能尽可能准确地描述舰船水动力性能在设计空间内的变化规律。主要方法有均匀方法采样、拉丁方方法采样、优化拉丁方方法采样以及 Sobol 方法采样等。

(2) 船体变形模块: 通过平移法、自由变形法、径向基函数法以及 Lackenyby 方法对船体几何曲面进行变形,在构建设计空间内由不同船型组成船型数据库。

(3) 水动力数值计算模块: 在设计空间内, 对不同的样本船型进行水动力性能数值仿真预测, 得到不同船型对应的快速性、操纵性和耐波性的性能指标, 为后续近似模型构建奠定基础。

(4) 近似模型构建模块: 根据设计空间内的设计变量与对应的样本船型水动力性能之间的对应关系, 使用响应面法、Kriging 法以及最新引入的 Co-Kriging 理论模型建立设计变量与对应船型水动力性能之间的函数映射关系, 为下一步优化求解奠定基础。

(5) 优化求解模块: 基于所建立的近似模型, 使用遗传算法、粒子群算法、高效全局优化算法等, 寻找最优水动力性能及对应的优化船型。

相关数值理论方法在文献中均有介绍^[12-14], 本文主要介绍数值求解方法以及近似模型构建、优化寻优方法。

1.2 数值求解方法

本文对于不同片体位置下的三体船阻力性能计算, 采用自主开发的黏流求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行数值仿真求解。该求解器以黏流理论为基础, 混合船体 6 自由度运动模块, 控制方程为不可压缩 RANS 方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)) = \nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{\text{eff}} + f_\sigma + f_s \quad (2)$$

式中, \mathbf{U} 为计算域速度场; \mathbf{U}_g 为网格变形时的网格节点速度; $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 表示动压力场, ρ 为气体或液体的密度; \mathbf{g} 为重力加速度; $\mu_{\text{eff}} = \rho(\nu + \nu_t)$ 表示有效动力黏性系数, 其中 ν 为运动黏性系数, ν_t 为涡黏度; f_σ 为表面张力, f_s 为消波区的源项。

采用流体体积 (volume of fluid, VOF) 方法^[12]对气液交界面进行捕捉, 数值计算采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[13]。

1.3 Co-Kriging 近似模型

在设计空间内构建不同片体位置的三体船模型, 使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对不同片体位置的三体船模型进行数值计算, 得到静水下的总阻力系数, 模型试验也可得到静水下的总阻力系数。在得到不同片体位置下的三体船总阻力系数后, 模型试验数据构成了高精度数据样本集合 \mathbf{X}_h , 数值仿真结果组成了低精度数据样本集合 \mathbf{X}_l , 如式 (3) 所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_h &= (\mathbf{x}_1^h, \mathbf{x}_2^h, \mathbf{x}_3^h, \dots, \mathbf{x}_n^h)^T \in \mathbb{R}^{n \times q} \\ \mathbf{X}_l &= (\mathbf{x}_1^l, \mathbf{x}_2^l, \mathbf{x}_3^l, \dots, \mathbf{x}_m^l)^T \in \mathbb{R}^{m \times q} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, \mathbf{x}_i^h 和 \mathbf{x}_i^l 分别表示高精度数据样本和低精度数据样本; n 和 m 表示有 n 个高精度数据样本和 m 个低精度数据样本; q 为设计变量个数。高精度数据样本和低精度数据样本对应的目标函数响应值分别为 \mathbf{Y}_h 和 \mathbf{Y}_l :

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_h &= (\mathbf{y}_1^h, \mathbf{y}_2^h, \mathbf{y}_3^h, \dots, \mathbf{y}_n^h)^T \in \mathbb{R}^{n \times k} \\ \mathbf{Y}_l &= (\mathbf{y}_1^l, \mathbf{y}_2^l, \mathbf{y}_3^l, \dots, \mathbf{y}_m^l)^T \in \mathbb{R}^{m \times k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, k 为目标函数个数。 \mathbf{y}_i^h 和 \mathbf{y}_i^l 分别表示高精度数据样本和低精度数据样本的响应值。

将高精度响应值视为高斯随机数, 则满足以下关系:

$$Z_h(\mathbf{x}) = rZ_l(\mathbf{x}) + Z_d(\mathbf{x}) \quad (5)$$

式中, r 为高精度数据和低精度数值之间的比例系数, Z_h 和 Z_l 分别为高精度和低精度响应值对应的高斯随机数, Z_d 为高精度数据和低精度数值之间的误差。

两类数据之间的对应协方差为

$$\text{cov}(Y_1(\mathbf{X}_1), Y_1(\mathbf{X}_1)) = \text{cov}(Z_1(\mathbf{X}_1), Z_1(\mathbf{X}_1)) = \sigma_1^2 \Psi_1(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_1) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{cov}(Y_h(\mathbf{X}_h), Y_h(\mathbf{X}_h)) &= \text{cov}(rZ_1(\mathbf{X}_h) + Z_d(\mathbf{X}_h), rZ_1(\mathbf{X}_h) + Z_d(\mathbf{X}_h)) \\ &= r^2 \text{cov}(Z_1(\mathbf{X}_h), Z_1(\mathbf{X}_h)) + \text{cov}(Z_d(\mathbf{X}_h), Z_d(\mathbf{X}_h)) \\ &= r^2 \sigma_1^2 \Psi_1(\mathbf{X}_h, \mathbf{X}_h) + \sigma_d^2 \Psi_d(\mathbf{X}_h, \mathbf{X}_h) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{cov}(Y_h(\mathbf{X}_h), Y_1(\mathbf{X}_1)) &= \text{cov}(rZ_1(\mathbf{X}_h) + Z_d(\mathbf{X}_h), Z_1(\mathbf{X}_1)) \\ &= r \sigma_1^2 \Psi_1(\mathbf{X}_h, \mathbf{X}_1) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, σ_1^2 和 σ_d^2 为对应 Z_1 和 Z_d 的方差。

组成的 Co-Kriging 协方差矩阵为

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 \Psi_1(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_1) & r \sigma_1^2 \Psi_1(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_h) \\ r \sigma_1^2 \Psi_1(\mathbf{X}_h, \mathbf{X}_1) & r^2 \sigma_1^2 \Psi_1(\mathbf{X}_h, \mathbf{X}_h) + \sigma_d^2 \Psi_d(\mathbf{X}_h, \mathbf{X}_h) \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, Ψ 为相关系数矩阵, 表达式为

$$\Psi(\mathbf{X}^*, \mathbf{X}) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{n_v} \theta_i \|\mathbf{X}_i^* - \mathbf{X}_i\|^{p_i}\right) \quad (10)$$

式中, p_i 为超参数; n_v 为变量个数, 一般取定值为 2; θ 用于表示变量的灵敏度, 通过极大似然估计方法得到, 极大似然函数定义为^[17-18]

$$-\frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2} \ln |\det(\Psi(\mathbf{X}, \mathbf{X}))| - \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{I}\mu)^T \Psi(\mathbf{X}, \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{I}\mu)}{2\sigma^2} \quad (11)$$

式中, 定义 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 为

$$\hat{\mu} = \frac{\mathbf{I}^T \Psi(\mathbf{X}, \mathbf{X})^{-1} \mathbf{y}}{\mathbf{I}^T \Psi(\mathbf{X}, \mathbf{X})^{-1} \mathbf{I}} \quad (12)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\mu})^T \Psi(\mathbf{X}, \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\mu})}{n} \quad (13)$$

综合上述式子, 极大似然函数可表示为

$$-\frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{n}{2} \ln(\hat{\sigma}^2) - \frac{1}{2} \ln |\det(\Psi(\mathbf{X}, \mathbf{X}))| \quad (14)$$

Co-Kriging 的预测方程为

$$y_e(\mathbf{x}^{(n_e+1)}) = \hat{\mu} + \mathbf{c}^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\mu}) \quad (15)$$

式中, \mathbf{c} 和 $\hat{\mu}$ 表达式为

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} \hat{\rho} \hat{\sigma}_c^2 \Psi_c(\mathbf{X}_c, \mathbf{x}^{(n+1)}) \\ \hat{\rho}^2 \hat{\sigma}_c^2 \Psi_c(\mathbf{X}_e, \mathbf{x}^{(n+1)}) + \hat{\sigma}_d^2 \Psi_d(\mathbf{X}_e, \mathbf{x}^{(n+1)}) \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\hat{\mu} = \frac{\mathbf{I}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{y}}{\mathbf{I}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{I}} \quad (17)$$

Co-Kriging 模型的误差为

$$s_2(\mathbf{x}) = \hat{\rho}^2 \hat{\sigma}_c^2 + \hat{\sigma}_d^2 - \mathbf{c}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{c} \quad (18)$$

1.4 优化算法

在使用高精度数据和低精度数值建立Co-Kriging模型后,运用单目标遗传算法进行机制寻优。单目标问题优化的简化定义为

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f(x) \\ & \text{subject to } g_i(x) \leq 0, \quad i=1, 2, \dots, p \\ & \quad \quad \quad h_j(x) = 0, \quad j=1, 2, \dots, q \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $f(x)$ 为目标函数; $g_i(x) \leq 0$ 表示不等式约束; $h_j(x) = 0$ 表示等式约束; p, q 均大于 0。

遗传算法是一种生物智能算法,属于无梯度优化算法的一种。通过设定初始种群(初始设计变量的取值)以及种群个体之间的遗传、交叉和变异等操作,目标函数对种群个体进行筛选,不断地迭代,在所构建的近似模型中找到最优个体(即最优目标函数值)以及所对应的最优设计变量。算法的流程如图 2 所示。

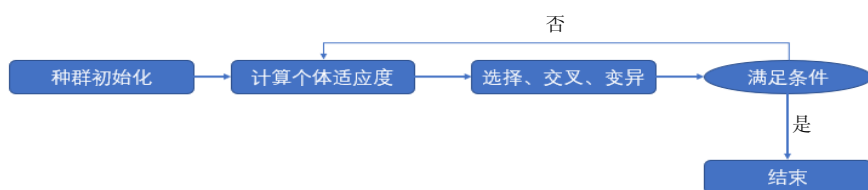


图 2 遗传算法流程图

2 优化与数值仿真计算设置

2.1 几何模型及片体设计空间构建

本文以某典型三体船为研究对象,三体船的几何模型如图 3 所示,主体和片体的主要几何参数如表 1 所示。

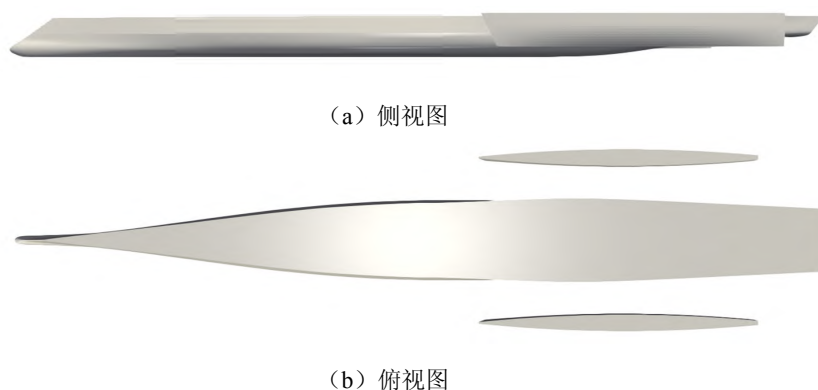


图 3 三体船的几何模型

表 1 三体船主体和片体的主要几何参数

类别	水线长/m	型宽/m	吃水/m	湿表面积/m ²	排水体积/m ³
主体	7.112 5	0.894 2	0.242 3	6.457 8	0.802 3
片体	3.313 0	0.197 8	0.129 1	0.882 6	0.037 9

受限于模型试验时间、人力和物力等因素,在拖曳水池中共对 3 种片体位置下的三体船进行了船模拖曳试验。拖曳水池长 474 m, 宽 14 m, 水深 7 m, 拖车车速范围: 0.2 ~ 20 m/s。模型阻力试验

按照 CB/Z 817-2019《一般排水型船舶阻力试验方法》和 Q/702J0101《舰船模型水面阻力试验检测实施细则》进行,阻力测试使用 R63 电测阻力仪,量程为 400 N,精度为 0.1%。纵倾升沉试验采用布置在与首尾一定距离的位移传感器进行测量,传感器量程为 100 mm,精度为 0.1%。为了丰富样本空间,使用数值求解方法对另外 7 种片体位置下的三体船进行了数值仿真。片体位置分布如图 4 所示。片体仅沿船长方向进行移动,片体沿船长方向位置的设置值如表 2 所示。

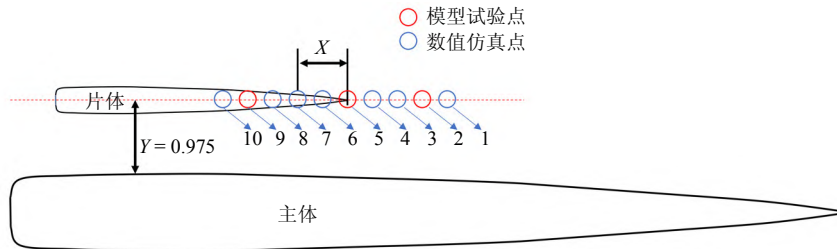


图 4 三体船片体位置分布

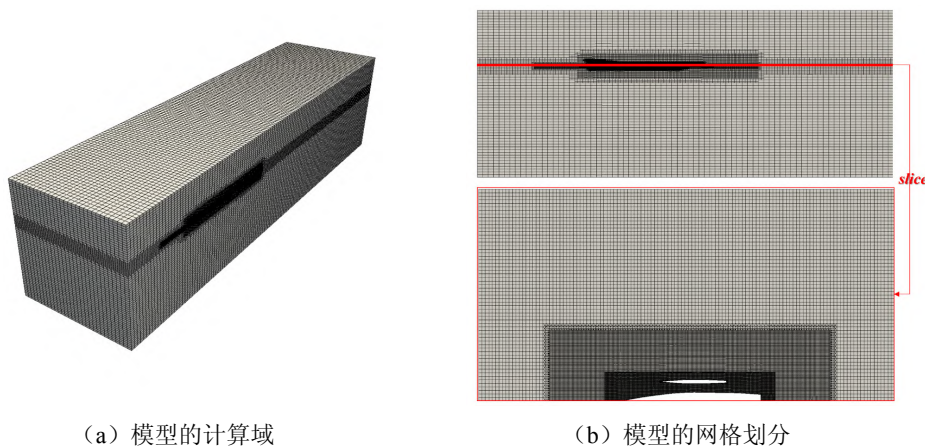
表 2 三体船片体位置分布值

单位: m

位置 1	位置 2 (试验点)	位置 3	位置 4	位置 5 (试验点)	位置 6	位置 7	位置 8	位置 9 (试验点)	位置 10
1.004	0.817	0.649	0.293	0.000	-0.062	-0.418	-0.774	-0.922	-1.129

2.2 CFD 数值模拟设置及精度验证

使用自主开发的黏流求解器 naoe-FOAM-SJTU 对三体船不同片体位置下的静水阻力进行数值仿真,为验证求解器的精度、可靠性以及选择合适的网格加密方式,首先使用该求解器对试验工况进行数值仿真,并与模型试验结果进行对比。为节省数值模拟时间,采用半域、半船进行计算。计算域范围设置为:沿船长方向(x 方向): $-4L_{pp} \leq x \leq 2L_{pp}$, L_{pp} 为三体船主体的垂线间长;沿船宽方向(y 方向): $0 \leq y \leq 1.5L_{pp}$;沿船高度方向(z 方向): $-1.0L_{pp} \leq z \leq 0.5L_{pp}$ 。使用 SnappyHexMesh 网格划分工具对模型进行网格划分,并对自由液面、船体周围进行网格加密以实现船体周围流场、兴波的精细化捕捉。船体表面边界层设置为 5 层。网格划分示意如图 5 所示。



(a) 模型的计算域

(b) 模型的网格划分

图 5 CFD模型的计算域及网格划分

三体船在高速航行过程中会产生尾倾。此姿态的变化对阻力数值的影响不可忽略不计,因此在 CFD 数值计算过程中调用 naoe-FOAM-SJTU 求解器的 6 自由度模块,释放船体纵摇方向的自由度,

以模拟真实的模型试验工况,最终的数值模拟和模型试验验证结果如表 3 所示。从中可以看出黏流数值求解软件 naoe-FOAM-SJTU 能够对不同片体位置下的三体船阻力进行准确预报,可以用于不同片体位置下的三体船阻力预报。

表 3 求解器精度验证

测点位置	总阻力系数试验值/ 10^{-3}	总阻力系数计算值/ 10^{-3}	误差/%
位置 2	3.828	3.967	3.62
位置 5	3.900	3.988	2.25
位置 9	4.104	4.088	0.39

2.3 Co-Kriging 模型构建及优化求解

根据模型试验高精度数据和数值模拟低精度数据共同建立 Co-Kriging 模型。因其为单变量、单目标模型,可使用图形界面进行可视化,所建立的 Co-Kriging 近似模型如图 6 所示(3 个模型试验样本点配合 7 个 CFD 数值模拟样本点)。从图中可以看出,相较于普通 Kriging 模型,Co-Kriging 在学习了原有高精度数据的基础上融合了低精度数据信息。在保持近似模型精度的同时,有效地避免了高精度数据获取所需要的大量人力、物力和财力等实际限制。

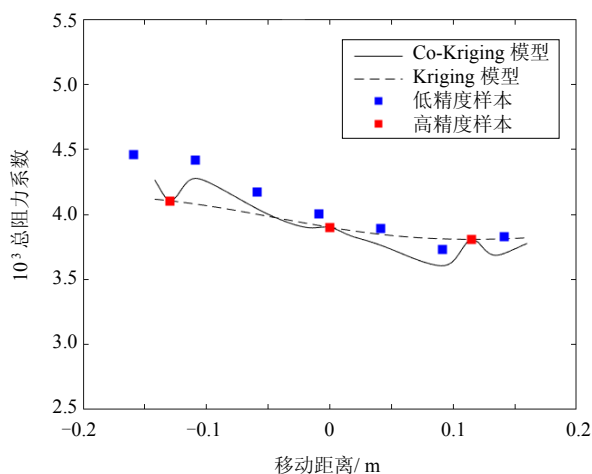


图 6 基于 CFD 数值模拟和模型试验所建立的 Co-Kriging 模型

根据所建立的 Co-Kriging 模型,使用单目标遗传算法进行极值寻优,最终得到理论阻力系数的最低值为 3.60×10^{-3} 以及最优的片体位置参数为 0.091 m。为验证近似模型的可靠性和精度,根据最优参数得到最优的三体船片体布局,使用 CFD 数值模拟方法对最优三体船的片体布局进行数值仿真,将结果与优化求解得到数值仿真最低阻力系数值进行对比。对比结果如表 4 所示,表中验证误差表示 CFD 验证出的最优船型阻力系数与数值仿真最优值之间的差异。验证误差小于 5%,表明所建立的 Co-Kriging 模型稳定性较好,可以优化得到低阻力船型。

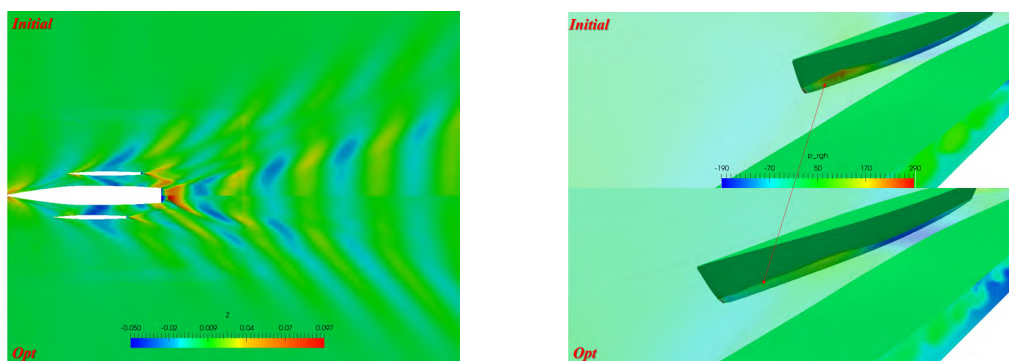
表 4 优化结果汇总

母型船	总阻力系数/ 10^{-3}		验证误差/%	优化幅值/%
	CFD验证优化船型	理论优化船型		
3.90	3.76	3.60	4.44	3.59

3 结果分析

通过构建 Co-Kriging 模型得到具有最优片体位置的三体船船型, 由图 6 中的总阻力系数随片体位置变化的趋势可知, 片体位置沿船体纵向的移动对船体阻力有着明显的规律性。从普通 Kriging 模型中预测的阻力变化趋势和 Co-Kriging 模型预测的阻力变化趋势大体一致, 均表现为片体位置向船体首部方向移动时阻力呈先减小、后增大的趋势。相较于普通 Kriging 模型单调的变化趋势, Co-Kriging 模型在试验数据的基础上吸收 CFD 数值仿真数据的变化趋势, 更能优化得出在设计空间内的阻力最小点。

图 7 为三体船自由液面兴波分布与片体首部的压力分布。通过图 7(a) 中母型船与优化船的自由液面兴波对比可知, 相较于母型船, 优化船的主船体尾部兴波增大, 但片体首部和尾部的兴波均有所降低, 片体与主体之间的波谷深度加大, 总体兴波干扰减小。图 7(b) 为三体船片体首部压力分布, 从片体首部兴波与主体兴波干扰可以看出, 母型船片体处于主体兴波的波峰处, 与自身兴波相叠加, 首部波峰比较大, 所消耗能量增加。优化船片体首部处于主体兴波的波谷处, 主体、片体之间的兴波干扰相对平缓。



(a) 自由液面兴波分布

(b) 片体首部压力分布

图 7 三体船自由液面兴波分布与片体首部压力分布比较

图 8 为三体船尾流场的流线图。通过母型船与优化船自由液面的流线对比可知, 母型船片体尾部有着明显的 V 型兴波, 其与主体尾部所产生的兴波发生了相互干扰, 导致母型船主体尾部的船后速度减小, 存在流动旋涡, 形成低压区, 进而增大了首尾之间的压差。而优化船片体尾部所产生的兴波与主体所产生的兴波相互干扰较小, 尾部没有明显的低压旋涡区, 因此相较于母型船而言, 其阻力较小。

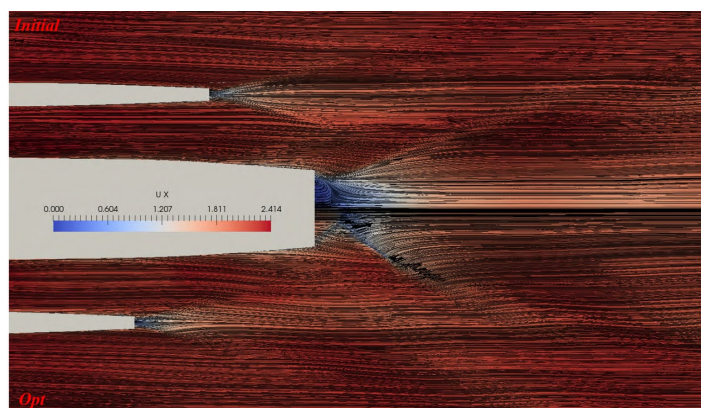


图 8 三体船型的母型船与优化船尾流场流线图对比

从流场分析上可知,三体船作为一种新型水面舰船形式,船体阻力随片体位置变化呈现着周期性的规律,优化片体位置是提高三体船快速性的一个重要手段。

4 结 论

本文利用船型优化软件 OPTShip-SJTU 对三体船片体位置进行了优化。采用低精度 CFD 数值计算和高精度模型试验相结合的方法构建 Co-Kriging 模型,实现了两种数据的相互协同。优化结果表明,相比于母型船,优化船型总阻力系数降低了3.59%。根据研究结果可得到以下结论:

(1) 船型优化软件 OPTShip-SJTU 可对三体船的片体位置进行数值优化,减少数值计算次数,并可以优化获得低阻力船型。

(2) 三体船的阻力随着片体在沿船长方向上的移动呈现周期性变化。

(3) 数值方法所获得的数据可替代部分模型试验的结果,借助 Co-Kriging 模型可以实现在保证优化效果的同时,大大减少获取数据的时间和模型试验所需的次数。

参 考 文 献

- [1] 秦石洁. 三体船及其研究现状[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2015, 24(1): 14-7.
- [2] 刘鑫旺, 詹开宇, 万德成. 势流理论评估下三体船主体船型及片体间距优化[C]// 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会, 重庆, 2019.
- [3] 李乐宇, 刘鑫旺, 万德成. 基于黏流对三体船主体与片体间兴波干扰对其阻力的影响分析[C]// 第三十一届全国水动力学研讨会, 厦门, 2020.
- [4] 张英晟. 船舶阻力计算及三体船片体布局优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [5] WANG S M, DUAN W Y, XU Q L, et al. Study on fast interference wave resistance optimization method for trimaran outrigger layout[J]. Ocean Engineering, 2021, 232(1): 104-109.
- [6] NAZEMIAN A, GHADIMI P. Global optimization of trimaran hull form to get minimum resistance by slender body method[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(2): 43-67.
- [7] NAZEMIAN A, GHADIMI P. CFD-based optimization of a displacement trimaran hull for improving its calm water and wavy condition resistance[J]. Applied Ocean Research, 2021, 113(1): 1-20.
- [8] NAZEMIAN A, GHADIMI P. Shape optimisation of trimaran ship hull using CFD-based simulation and adjoint solver [J]. Ships and Offshore Structures, 2020, 19(2): 1-15.
- [9] NAZEMIAN A, GHADIMI P. Multi-objective optimization of trimaran sidehull arrangement via surrogate-based approach for reducing resistance and improving the seakeeping performance[C]// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2020.
- [10] ASKARIAN K A, FEIZI A, MOHAMADI A, et al. An experimental study on the effect of the side hull symmetry on the resistance performance of a wave-piercing trimaran[J]. Journal of Marine Science and Application, 2021, 20(3): 456-466.
- [11] KURSETGJERDE A M S. Hydrodynamic optimization of trimaran workboat hulls[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology(NTNU), 2017.
- [12] 赵峰, 李胜忠, 杨磊, 等. 基于 CFD 的船型优化设计研究进展综述[J]. 船舶力学, 2010, 14(7): 812-821.
- [13] 赵敏, 崔维成. 多学科设计优化研究应用现状综述[J]. 中国造船, 2007, 48(3): 63-72.
- [14] 郝寨柳, 刘祖源, 冯佰威. 多目标优化算法在船舶多学科设计优化中的应用[J]. 中国造船, 2014, 55(3): 53-63.
- [15] RUSCHE H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions[D]. London: Imperial

- College London (University of London), 2003.
- [16] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, 4(1): 625-632.
- [17] XIAO M, ZHANG G, BREITKOPF P, et al. Extended Co-Kriging interpolation method based on multi-fidelity data[J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 323: 120-131.
- [18] 郭峰. Co-Kriging 代理模型在压气机叶栅气动优化中的应用研究[D]: 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

Optimization of Side Hull Position for Trimaran Based on CFD Numerical Simulation and Model Test

LIU Zhiqiang, LIU Xinwang, WAN Decheng*

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

Abstract

In this paper, we use a combination of low-precision CFD numerical calculations and high-precision model tests to optimize side hull positions of a trimaran at $Fr = 0.27$ with the total resistance as the target. Model tests are conducted for three hull positions of the trimaran in a towing tank. The in-house CFD viscous flow numerical solver naoe-FOAM-SJTU was used to perform numerical hydrodynamic calculations for other side hull positions. Based on the model test results and numerical calculation results, the trimaran side hull positions are optimized using software OPTShip-SJTU. The Co-Kriging approximation model is constructed, which ensures the reliability of the optimization results. The results show that total resistance of the trimaran with different side positions appears distinct variation pattern in the longitudinal direction.

Key words: trimaran; optimization of side hull; numerical simulation; naoe-FOAM-SJTU; Co-Kriging; OPTShip-SJTU

作者简介

刘志强 男, 1995 年生, 博士后。主要从事船舶与海洋工程计算水动力学研究。

刘鑫旺 男, 1993 年生, 博士后。主要从事船舶与海洋工程计算水动力学研究。

万德成 男, 1967 年生, 长江学者特聘教授, 博士研究生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学、计算流体力学、船舶与海洋工程水动力学 CAE 软件、高性能计算等研究。

*通讯作者: 万德成