

# 基于兴波阻力最小的集装箱船船型优化

王晋楷, 缪爱琴, 万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心)

\*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

**摘要:** 船舶阻力性能是船舶重要的水动力性能之一。它与造船实际工程密切相关, 可以通过船型优化设计出低阻力的优良船型。本研究基于课题组自主开发的船型优化软件 OPTShip-SJTU, 以某实际集装箱船船模为母型船, 对船舶首部和后半体同时进行优化。通过自由变形方法 (FFD) 对船型进行变换, 优化过程中对船舶排水体积变化进行严格约束 (变化量范围 $\pm 0.4\%$ ), 寻求单个航速下 ( $v=18\text{kn}$ ) 的兴波阻力最优的船型。船舶阻力评估采用课题组自主开发的基于 Neumann-Michell 势流理论的 NMShip-SJTU 求解器进行求解, 优化算法采用遗传算法。最终得到优化船型较母型船的兴波阻力降低 33.5%。验证了基于 NM 理论进行船型优化的合理性和可靠性。

**关键词:** Neumann-Michell; OPTShip-SJTU; 阻力性能; 船型优化

## 1 引言

型线设计是船舶设计中重要的一个环节, 对船舶的各方面性能有着重要影响。拥有优良的型线, 后续的总布置设计、机舱布置、内部舾装布置等才能顺利进行。因此, 在船舶的初始设计阶段, 基于水动力性能的船舶型线优化设计是必要的。同时, 随着船舶设计不断向节能、绿色、安全的方向发展, 船舶型线的优化设计更加重要, 为船舶行业的转型升级提供技术支持, 已然成为当下十分重要的研究课题。

传统的型线设计通常是根据母型船的型线或者系列船型试验资料, 通过一些规则与方法, 对型线进行修改, 得到设计船的型线。这种传统的型线设计方法依赖于设计者的经验和型线资料库, 并且需要在型线设计和性能校核之间反复多次才能得到最终的型线, 得到的型线仅是可行型线, 不一定是最优型线, 且设计成本较高, 设计周期长。

随着船舶与海洋工程行业的不断发展, 传统的型线设计方法已经很难满足船舶设计的创新理念, 同时随着计算机的飞速发展和数学理论的不完善, 基于 CFD 的船型优化设计

成为热潮，这样的船型优化设计在一定程度上降低了船模试验的成本，提高了优化效率。然而，为了通过船型优化设计得到水动力性能最优的船型，设计者往往要通过大量的水动力性能评估，这使得设计过程需要耗费大量的计算成本和时间。因此，迫切需要一套实用有效的基于 CFD 的船舶水动力性能优化工具，节约设计计算的成本与时间。

基于水动力性能的船型优化软件 OPTShip-SJTU 是基于船型变换方法、试验设计方法、近似模型技术、优化算法、Neumann-Michell 理论而开发的。主要由 4 个模块组成：船型变换、水动力性能评估、近似模型建立、单目标（或多目标）优化求解。目前，船型变换方法主要是平移法，径向基函数法以及自由变形方法；水动力性能评估主要是基于 Neumann-Michell 势流理论方法和基于黏流的 CFD 计算方法；近似模型方法主要有响应面方法，Kriging 模型等，来节省目标函数评估的时间与成本；优化算法主要有传统的基于梯度的优化算法和模拟退火算法、进化算法、遗传算法以及粒子群法等基于随机搜索思想的启发式优化算法。OPTShip-SJTU 求解器已成功用于一些典型船模的水动力性能优化中，并取得了良好的结果。

## 2 优化流程与方法

基于 OPTShip-SJTU 求解器的船型优化一般流程为：首先根据所选用的船型变换方法，选定  $k$  个相关几何参数作为设计变量，人为确定一个  $k$  维设计空间，对母型船进行船型变换。在优化迭代之前，引入试验设计和近似技术，以降低设计成本：科学地在设计空间布满样本点，然后利用基于势流或黏流的水动力评估方法对系列变形后的新船型进行水动力性能评估，以已知的样本点构建近似模型，这样目标函数可以调用近似模型进行计算，而无需进行高精度的数值模拟，大大加快了优化的进程。最后通过适当的优化算法获得优化船型。若未得到符合要求的优化船型，则重新修改优化方案，反复进行上述过程。求解器的基本结构图如图 1 所示。

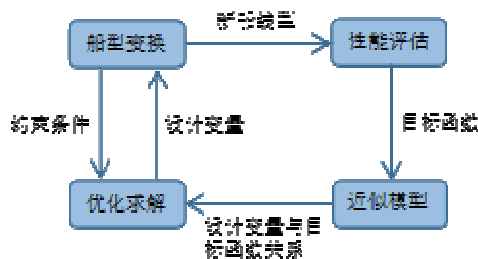


图 1 OPTShip-SJTU 求解器基本结构

### 2.1 船型变换方法：FFD 方法

采用自由变形方法（Free-Form Deformation, FFD）对母型船进行变换，该方法是由

Sederberg 和 Parry 在 1986 年提出的一种网格自由变形方法。已经被广泛应用于包括船舶几何重构在内的各个领域。其基本思想是：①首先选定一个格子 (Lattice)，格子的大小与位置确定了待变形区域的大小与位置；②在格子内选定一系列控制点，并通过 Bernstein 多项式建立船体表面点坐标与控制点坐标间的关系；③以部分控制点位移量位设计优化变量，通过移动控制点位置，来实现船体曲面变形。

FFD 方法涉及的设计变量较少，曲面变化非常灵活，并且对变形区域的大小和位置严格可控，同时该方法简洁明快，易于编程实现。具体推导公式可参见文献[5]

## 2.2 水动力性能评估方法

本研究采用采用 NMSHIP-SJTU 求解器进行变换船型的静水阻力计算，该求解器是基于 Neumann-Michell 理论而开发的。基于 NM 理论的阻力预报效率非常高，同时也具有一定的精度，因此非常适用于船型优化。其基本原理如下。

一艘船长为  $L_s$  的船舶以匀速  $V_s$  沿直线前进，它所在的水域拥有无限大的自由水面与无限水深，没有外来的波浪干扰，不考虑水的黏性。我们在一个固定于船上并随船运动的右手直角坐标系  $\mathbf{X} \equiv (X, Y, Z)$  中观察船体周围的流动，无因次化坐标定义为  $\mathbf{x} \equiv \mathbf{X} / L_s$ ，无因次化速度定义为  $\mathbf{u} \equiv \mathbf{U} / V_s$ ，无因次化速度势定义为  $\phi \equiv \Phi / (V_s L_s)$ 。

NM 理论基于格林函数方法。将边界积分表达式结合船体是表面处的不可穿透边界条件  $\mathbf{n} \cdot \nabla \phi = n^x$ ，并忽略自由表面升高中的非线性项，可以得到：

$$\tilde{\phi} = \int_{\Sigma_a} G n^x da - \int_{\Sigma_a} \phi \mathbf{n} \cdot \nabla G da + F^2 \int_{\Gamma} \frac{\phi G_x - G \phi_x}{\sqrt{(n^x)^2 + (n^y)^2}} n^x dl + \int_{\Sigma_F} (\pi^G \phi - G \pi^\phi) dx dy \quad (1)$$

其中  $F$  表示傅汝德数， $\pi^G$  和  $\pi^\phi$  的定义为： $\pi^G \equiv G_z + F^2 G_{xx}$ ， $\pi^\phi \equiv \phi_z + F^2 \phi_{xx}$ ， $\Gamma$  代表平均水线。我们将格林函数  $G$  分解为兴波部分  $W$  与当地流动部分  $L$  两部分，经过一系列数学变换，得到 NM 理论的最终表达式：

$$\tilde{\phi} = \tilde{\phi}_H + \tilde{\psi}^W \quad (2)$$

其中：

$$\tilde{\phi}_H \equiv \int_{\Sigma^M} G n^x da - \int_{\Sigma^F} G \pi^x dx dy \quad (3)$$

$$\tilde{\psi}^W = \int_{\Sigma^M} (\phi_r \mathbf{d}_\phi + \phi_a \mathbf{t}_\phi) \cdot \mathbf{W} da \quad (4)$$

式 (3) 和式 (4) 中  $\mathbf{d}_\phi$ ， $\mathbf{t}_\phi$ ， $\mathbf{t}'$ ， $\mathbf{d}'$  均是和船体相切的单位向量，波浪函数  $\mathbf{W}$  与  $W$  满足  $\nabla \times \mathbf{W} = \nabla W$  关系。

## 2.3 全局优化算法

随着船舶科学地迅速发展，船体型线设计已经很难在局部寻找到更优设计，有效的全局优化算法应被应用到船舶优化设计中去。遗传算法是一种全局优化算法，它从一组被称为群体的随机产生的初始解进行搜索，在群体中的每个个体均为问题的一个解，称为染色

体, 遗传算法中的遗传指的就是这些染色体在迭代中不断进化。遗传算法通过交叉、变异、选择运算实现, 其中交叉和变异运算生成后代, 根据适应度的大小在后代中选择一定数量的个体作为下一代群体, 继续进化, 最终收敛于最好的染色体, 成为问题的最优解。

遗传算法结构简单, 便于求解, 搜索效率高, 且能运用于全局计算中, 因此适合船舶优化设计, 单目标遗传算法的优化参数配置表如表 1 所示。

**表 1 遗传算法基本参数配置**

每代个体数	遗传率	交叉率	变异率	最大迭代数
50	0.2	0.8	0.2	200

### 3 优化问题

#### 3.1 优化对象

拟对某实际集装箱船进行优化, 采用模型尺度进行优化设计。实船与船模的主尺度如表 2 所示。

**表 2 集装箱船实船与船模主尺度**

主尺度	符号与单位	实船	船模
缩尺比	$\lambda$		42
垂线间长	$L_{PP}(\text{m})$	260.00	6.191
水线长	$L_{WL}(\text{m})$	264.00	6.286
型宽	$B(\text{m})$	32.22	0.767
吃水	$T(\text{m})$	12.00	0.286
湿表面积	$S(\text{m}^2)$	5680.43	3.22
排水体积	$\nabla (\text{m}^3)$	64378.26	0.8690
傅汝德数	$Fr$		0.1834

#### 3.2 目标函数与设计变量

本研究仅对该集装箱船进行阻力的优化, 且将排水体积的变化控制在  $\pm 0.4\%$ , 故本次优化设计的目标函数及约束条件为:

$$f_{obj} = R_w (Fr = 0.1834) \quad (5)$$

$$\delta \nabla = \pm 0.4\% \quad (6)$$

优化区域为船首和船尾,在首部设置了3个大小不同的格子,Lattice1 设置在球鼻艏处,控制点分别沿着船长和船宽方向移动,使得球鼻艏在船长和船宽方向变形,同时在球鼻艏处设置一个绕 y 轴旋转的变量,来调整球鼻艏的位置; Lattice2 和 Lattice3 也设置在船首的不同位置,不同控制点沿着船宽方向移动不同长度,来改变船首形状; Lattice4 设置在船尾处,控制点沿着船宽方向移动,来调整船尾部形状。上述 Lattice 如图 2 至图 5 所示,其中红色的点为可移动控制点,绿色的点为固定点(确保边界曲面光滑)。因此,优化设计采用了 9 个独立的设计变量,其中包括 1 个旋转变量和 8 个控制点的不同位移量,如表 3 所示(此处量级均为相对船长无因次化后的结果)。

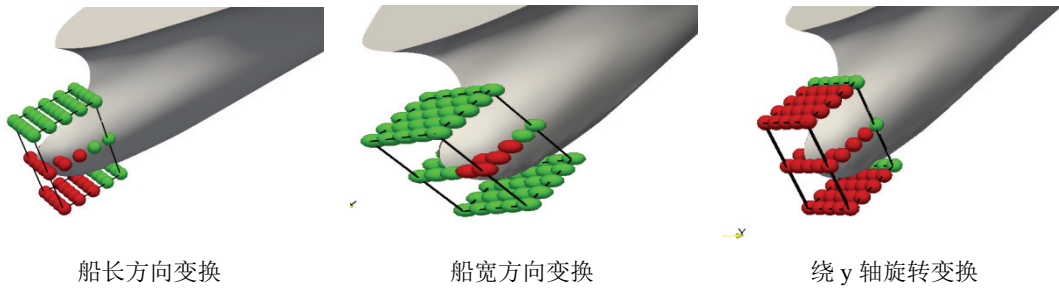


图 2 Lattice1 的可变区域和控制点分布

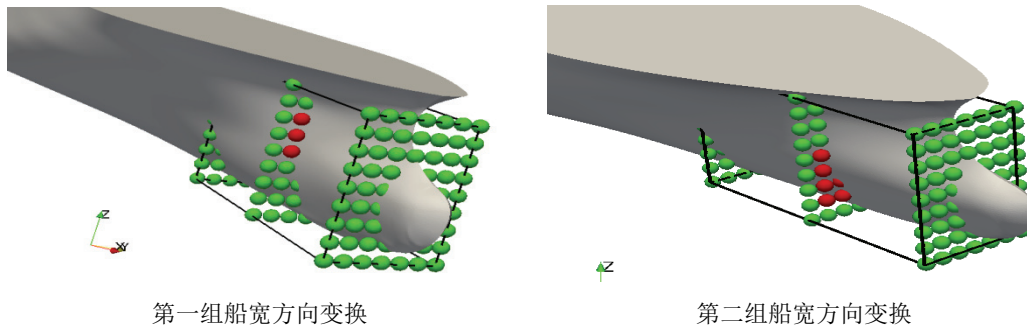


图 3 Lattice2 的可变区域和控制点分布

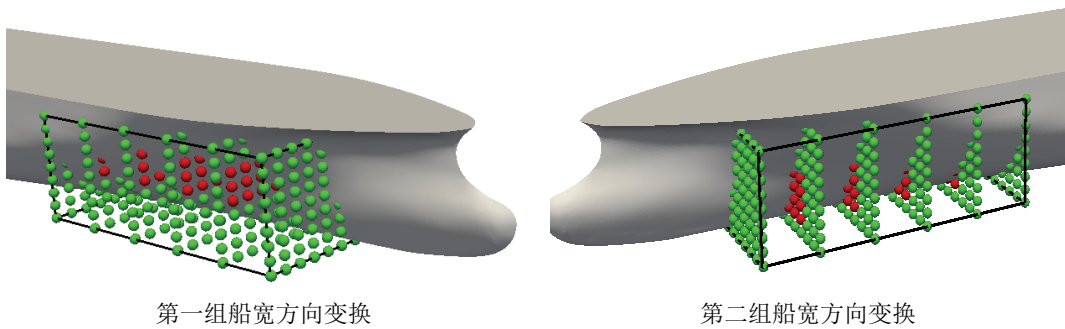


图 4 Lattice3 的可变区域和控制点分布

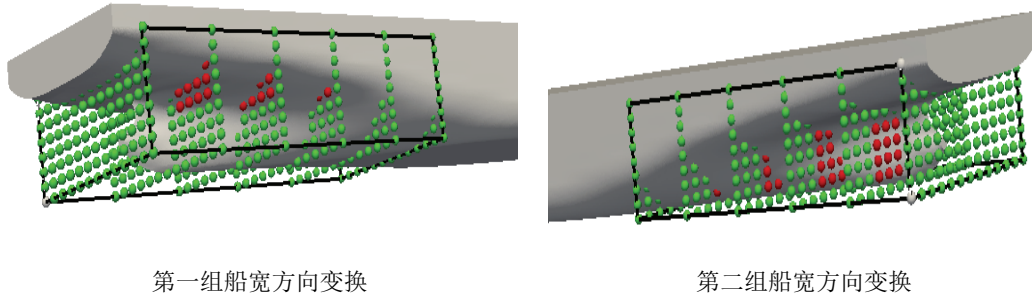


图5 Lattice4 的可变区域和控制点分布

表3 基于 FFD 变形参数的设计变量及范围

Lattice	设计变量	下界	上界
Lattice1	$X_1$	-0.01	0.01
	$Y_1$	-0.01	0.01
	$R_1$	-20	20
Lattice2	$Y_2$	-0.015	0.015
	$Y_3$	-0.015	0.015
Lattice3	$Y_4$	-0.015	0.015
	$Y_5$	-0.01	0.01
Lattice4	$Y_6$	-0.01	0.01
	$Y_7$	-0.01	0.01

本算例中共计 9 个设计变量，通过最优化拉丁方法（OLHS）选取 90 个样本点充满整个空间，利用 NMSHIP-SJTU 求解器对这 90 个新船型进行静水阻力计算，得到目标函数，构建近似模型。

#### 4 优化结果

由 Kringing 方法建立的近似模型，进行遗传算法迭代，得到收敛结果如图 6 所示。

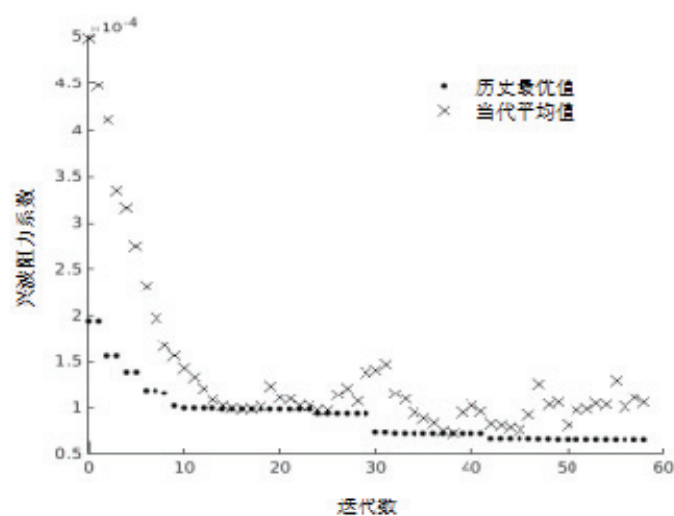


图6 遗传算法收敛结果

得到最终的优化结果如表4所示。

表4 优化结果

	兴波阻力系数/ $\times 10^{-4}$	排水体积/ $m^3$
初始船型	3.952	0.868
最优船型	2.628	0.870
改变量	-33.5%	0.23%

从上述优化结果可以得出，所得的最优船型在 18kn 速度下 ( $Fr=0.1834$ ) 兴波阻力系数有明显的下降，湿表面积和排水体积变化不大，符合约束条件的要求。根据所得最优船型的设计变量值，获得最优船型的型线图。最优船型与原始船型横剖面图以及纵剖面图对比图如图7和图8所示。可以看出优化船型的球鼻艏较原始船型稍向上偏移，船首上半部分略微变胖，下半部分略微变瘦，船尾部分较原船偏胖。

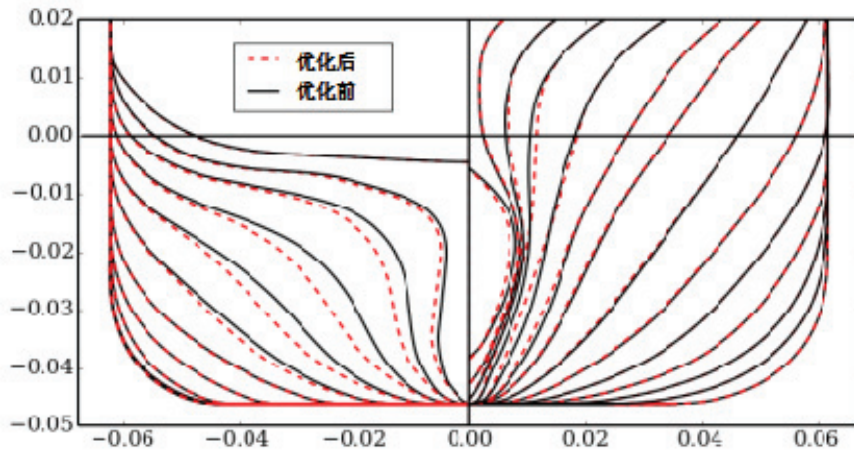


图7 优化前后横剖线对比

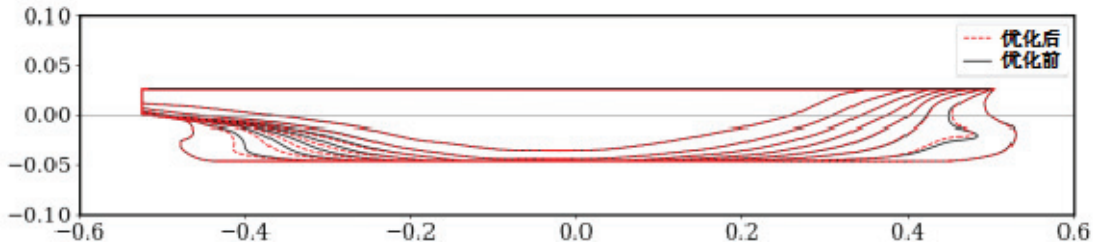


图8 优化前后纵剖线对比

优化船型与原始船型自由面波形对比如图9和图10所示,可以看出,在船首和船尾处,优化船型较原始船型的自由面波高均有所下降,其中船尾处波峰及波谷下降效果较为明显。

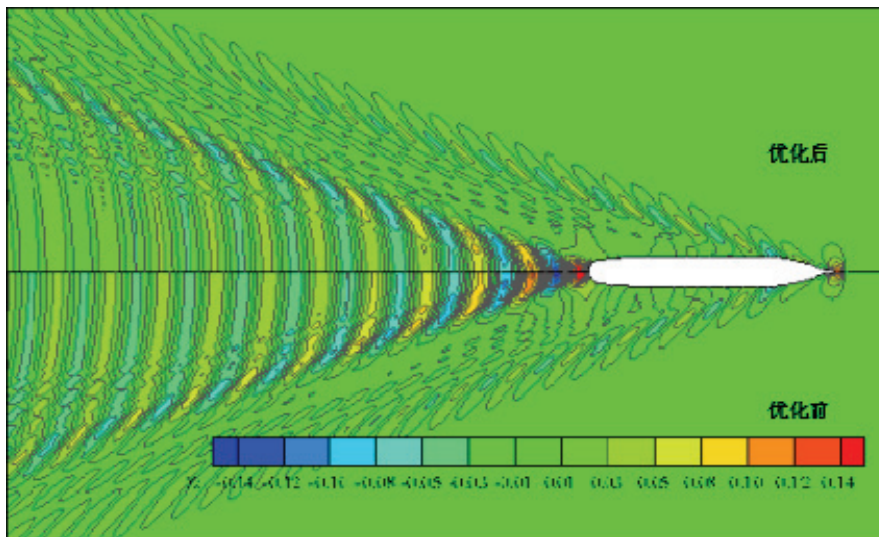


图9 优化前后自由面兴波对比



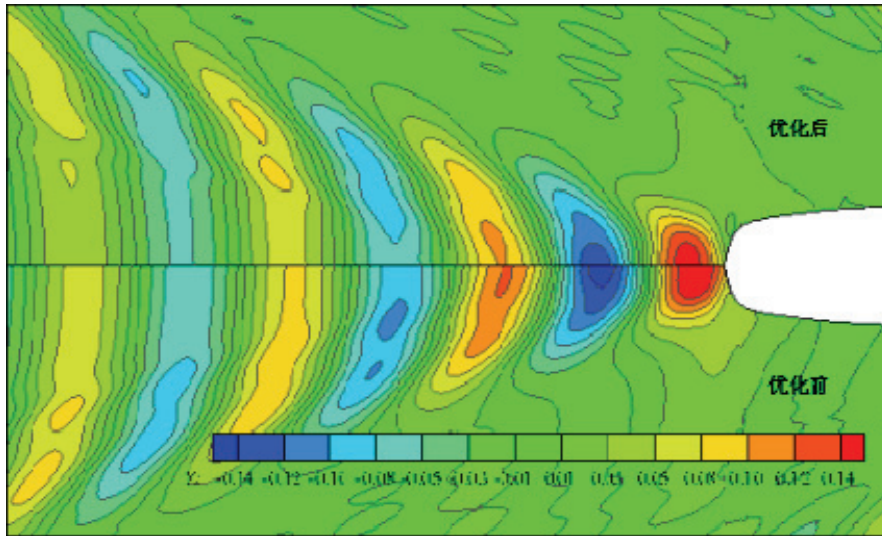


图 10 优化前后船尾自由面兴波对比

优化船型与原始船型的船体表面压力分布如图 10 所示，从图 10 中可以看出，船首正压区和负压区均有明显改善，压力幅值有所改善。



图 10 优化前后船首压力对比

## 5 结论

本研究以某实际集装箱船作为原始船型,以兴波阻力作为优化目标,利用平移法进行船型变换,采用 OPTShip-SJTU 求解器进行船型优化设计,通过遗传算法最终获得优化船型,并利用 NMShip-SJTU 求解器进行兴波阻力计算。与原始船型相比,在  $Fr=0.1834$  下兴波阻力系数下降 33.5%。通过优化船型与原始船型型线、自由面波形、船首压力分布等细节的对比分析,证明了优化船型的阻力降低是合理有效的。以后的研究中应利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算总阻力,进行进一步的验证分析。

### 致谢

本研究工作获得国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099),上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022),上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300),以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Yang C., et al. Hydrodynamic optimization of a triswach. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 26(6):856-864
- 2 Zhang B.J., Zhang Z.X. Research on theoretical optimization and experimental verification of minimum resistance hull form based on Rankine source method. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, 7(5):785-794
- 3 詹成胜, 刘祖源, 冯佰威, 等. 基于 CFD 的船舶球首型线自动优化. *船舶力学*, 2012, 16(4):350-358
- 4 Sederberg T. W., S. R. Parry. Free-form deformation of solid geometric models. *SIGGRAPH Comput. Graph*, 1986, 20(4):151-160
- 5 Coquillart S. Extended free-form deformation: a sculpturing tool for 3D geometric modeling. *SIGGRAPH Comput. Graph*, 1990, 24(4):187-196.
- 6 刘晓义, 吴建威, 万德成. 基于遗传算法与 NM 理论的船型优化. *水动力学研究与进展*, 2016, 31(5):535-541
- 7 Noblesse F., et al. The Neumann-Michell theory of ship waves. *Journal of Engineering Mathematics*, 2012, 79(1):51-71
- 8 Wu J., Liu X., Zhao M., et al. Neumann-Michell theory-based multi-objective optimization of hull form for a naval surface combatant. *Applied Ocean Research*, 2017, 63:129-141
- 9 Liu X., Wu J., Wan D. Multi-objective optimization for a surface combatant using Neumann-Michell theory and approximation model. *Proceedings of the 12th International Conference on Hydrodynamics*. September 18-23, 2016, Egmond aan Zee, the Netherlands.

10 沈志荣, 叶海轩, 万德成. 船舶在迎浪中运动响应和波浪增阻的 RANS 数值模拟. 水动力学研究与进展: A 辑, 2012, 27(6):621-633

## **Ship hull optimization of a container ship based on minimum wave making resistance**

WANG Jin-kai, MIAO Ai-qin, WAN De-cheng\*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering,  
Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea  
Exploration, Shanghai 200240, China

\*Corresponding author: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn))

**Abstract:** Resistance is one of important hydrodynamic performance of a ship. It is closely related to practical ship building engineering, good ship hull with low resistance can be designed by ship hull optimization. In this paper, based on the ship hull optimization software OPTShip-SJTU solver developed Independently by our group, an actual container ship model is used as parent ship, and the front body and after body of this ship are optimized at the same time. The ship hull is deformed by free-form deformation method (FFD). The displacement is strictly restricted (variation range is  $\pm 0.4\%$ ) during the optimization process, and the optimal ship hull with low wave making resistance under the speed of 18kn is found. Ship resistance is evaluated by NMShip-SJTU solver which is based on Neumann-Michell theory and is developed Independently by our group. Genetic algorithm is used as optimization method. Finally, the optimal ship hull is got, and the wave making resistance is reduced by 33.5% compared with parent ship. The rationality and reliability of ship hull optimization based on NM theory are validated.

**Key words:** Neumann-Michell; OPTShip-SJTU; Resistance performance; Ship hull optimization.