

基于 CFD 的船体型线多目标优化设计

吴建威, 缪爱琴, 刘晓义, 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, 上海, 200240)

*通信作者, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 在船舶设计过程中, 船体型线设计至关重要, 它将直接影响到船舶的水动力学性能和营运的经济效益。因而, 如何基于母型船的设计, 通过优化技术改良得到更高水平的型线设计已经成为船舶工程界所关注的焦点问题。在本文中, 我们以 KCS 船为母型船, 以该船在设计航速 ($Fr=0.26$) 下的总阻力系数最小及船艉桨盘面处伴流最均匀为两个优化目标对母船型线开展优化设计。优化过程将分为三个部分: 船体曲面变换, 目标函数评估与优化算法计算。在船体曲面变换阶段, 我们利用自由变形方法 (FFD 方法), 分别针对球鼻艏与船艉曲面进行变形。在目标函数评估阶段, 我们首先采用叠模法, 利用 OpenFOAM 提供的粘流求解器 pimpleDyMFoam 对船体的粘性阻力与船艉桨盘面的伴流场进行求解, 又通过势流理论 (NM 理论) 对船体兴波阻力进行预报。最终, 我们以兴波与粘性阻力之和作为船体总阻力的解, 并基于桨盘面附近的流场得到伴流均匀度——此即为本文所关心的两个优化目标函数值。在优化计算阶段, 我们首先采用优化拉丁方方法 (OLHS) 进行试验设计, 并依据试验设计点建立了克里格 (Kriging) 近似模型, 又选取多目标遗传算法 NSGA-II 为优化方法, 最终得到了理想的优化船型。对优化结果的考察分析表明, 该优化流程及各方法是有效、可靠的。基于 CFD 方法既能提高对目标函数的评估精度, 又能得到丰富的流场信息, 为实现真正的多目标优化设计提供了可能。

关键词: CFD; 船型优化; 静水阻力; 伴流均匀度; Kriging 近似模型

Muti-objective optimization design of ship hull

Jianwei Wu, Xiaoyi Liu, Aiqin Miao, Decheng Wan*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China
Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

Abstract: Hydrodynamic performance optimization has always been an important part of ship conceptual design, for its direct demonstration to economy and usability of the ship. Accordingly, it has been a focus problem that how to improve the level of design based on parent ship hull through optimization technology. In this paper, KCS hull had been chosen as the initial hull, and two optimization objective were set as the minimum drag at $Fr=0.26$ and wake evenness at the disk. There were three parts including surface deformation, hydrodynamic performance evaluation and optimization consist of the whole processing. Firstly, different hull forms would be generated through Free-Form Deformation (FFD) method by modifying the local surface at the bow and stern. Then the wake evenness at the propeller disk was evaluated with CFD computation, and it notable that the double model method was introduced here to reduce the effort of calculation while the free surface effects were ignored due to the low ship speed. Wave-making drag was predicted with Neumann-Michell (NM) theory and the viscous resistance was given in earlier double model case which was conducted with the pimpleDyMFoam based on OpenFOAM. For optimization module, a muti-objective genetic algorithm, NSGA-II, is adopted to produce pareto-optimal front. In addition, Optimized Latin Hypercube Sampling (OLHS) method and Kriging model are employed here to establish the relationship between the objective functions and the design variables. Finally the optimal hull designs with high performances had been got, and the further analysis was also drawn. Numerical results confirm the availability and reliability of the multi-objective optimization tool.

Key Words: CFD; ship hull optimization; total drag; wake evenness; Kriging model

1. 引言

在船舶设计过程中，型线设计至关重要。船型的设计水平直接影响到船舶的水动力学性能综合航行性能和经济营运效益等。因而，如何基于母型船的型线改良得到更高水平的型线设计已经成为船舶工程界所亟需解决的焦点问题之一。传统的做法是从母型船的型线出发，结合相关的数据库资料，凭借设计者的设计经验对母船型线作出修改，最后通过船模试验进行验证。如此反复，最终得到合适的新船型。传统方法效率低，周期长，且严重依赖于设计者本身的经验判断，难以得到最优方案。

近些年来，伴随着计算机技术的蓬勃发展和计算理论的不完善，使得基于数值计算的船型优化设计（Simulation Based Design, SBD）技术成为可能。它是集成了船型变换方法、最优化技术以及数值计算模块的新型设计模式。该技术利用几何重构方法变换并表达船型，再结合数值方法预报各船型方案的水动力学性能，最终借助优化算法得到满足约束条件的性能最优方案。近年来，国内外学者对船型优化技术做了广泛的研究，并取得了丰硕的成果。

Tahara 等^[1]分别采用基于势流理论和 URANS 方程的两种求解器，对高速双体船进行了单目标优化设计、单目标多点优化设计与多目标优化设计三种优化设计，并对优化结果进行了模型试验，验证了优化技术的可行性与可靠性。Tahara 等^[2]又通过参数模型法，引入六个设计参数控制船型生成，并利用序列二次规划方法对 DTMB5415 的船首、声纳罩、船尾型线进行了优化。Peri 等^[3]以总阻力和船艏兴波波幅作为目标函数对某油船球鼻艏的几何外形进行优化，该研究以贝塞尔曲面实现船体曲面重构，又分别基于三种不同的优化算法变梯度法（CG），序列二次规划（SQP），最速下降法（SD）进行优化计算，最终对优化结果进行了模型试验验证。Kim^[4]以总阻力最小为目标函数、以多目标遗传算法（MOGA）为优化格式对 S60 船在三种速度下的阻力性能进行优化。该研究选取平移法（Shifting Method）和径向基函数法（RBF Method）表达和修改船型，采用 NM 理论求解船体阻力，并基于方差分析（ANOVA）研究了各优化变量对目标函数的影响状况，最终得到了阻力显著下降的优化结果。国内学者在这一领域也做出了许多工作。冯佰威等^[5]利用叠加调和方法（Morphing Approach）成功实现了对两个初始船型的线性叠加重构，并以总阻力为优化目标得到了最优的重构船型。李胜忠^[6]以贝塞尔曲面（Bezier Patch）局部几何重构法以及 FFD（Free-Form Deformation）整体几何重构法为建模重构方法，以改进的粒子群优化算法（IPSO）为优化格式对 DTMB 船型进行了优化，最终使优化船型在整个航速范围内的最大阻力收益达到了 6.73%。张宝吉等^[7]通过日本铃木和夫提出的船型修改函数变换船型，借助 Dawson 方法和遗传算法，以总阻力为优化目标，对某高速巡逻艇进行船型优化，得到了总阻力下降 13.1% 的最优船型。李胜忠^[8]采用多目标粒子群优化算法（MOPSO）、FFD 几何重构方法对船艏线型进行了自动优化设计。结果表明：在满足工程约束条件的情况下，6600DWT 散货船优化设计方案阻力的收益较为显著，其中一个优化方案在尾部流场质量改善的情况下，剩余阻力减小了 10.3%。

本文以 KCS 船为母型船，以该船在设计航速（ $Fr=0.26$ ）下的总阻力系数最小及船艏桨盘面处伴流最均匀为两个优化目标对母船型线开展优化设计。在船型变换阶段，我们利用自由变形方法（FFD 方法）分别针对球鼻艏与船艏曲面进行变形。在目标函数评估阶段，我们首先采用叠模法，利用 OpenFOAM 提供的粘流求解器 `pimpleDyMFoam` 对船体的粘性阻力与船艏桨盘面的伴流场进行求解，又通过势流理论（NM 理论）对船体兴波阻力进行预报。最终，我们以兴波与粘性阻力之和作为船体总阻力的解，并基于桨盘面附近的流场得到伴流均匀度。在优化计算阶段，我们首先采用优化拉丁方方法（OLHS）进行试验设计，并依据试验设计点建立了克里格（Kriging）近似模型，又选取多目标遗传算法 NSGA-II 为优化方法，最终得到了理想的优化船型。对优化结果的考察分析表明，该优化流程及各方法是有效、可靠的。基于 CFD 方法既能提高对目标函数的评估精度，又能得到丰富的流场信息，为实现真正的多目标优化设计提供了可能。

2. 优化流程与方法

船型优化是一项多环节紧密衔接的综合技术。其主要分为船型的变化与表达，水动力性能的求解与评估，优化算法中的搜寻与筛选三个部分。

2.1 船型变换方法——FFD 方法

首先在一个包含待变形物体的长方体中构造局部坐标系 O' -STU 构造局部坐标系如图 1 所示：

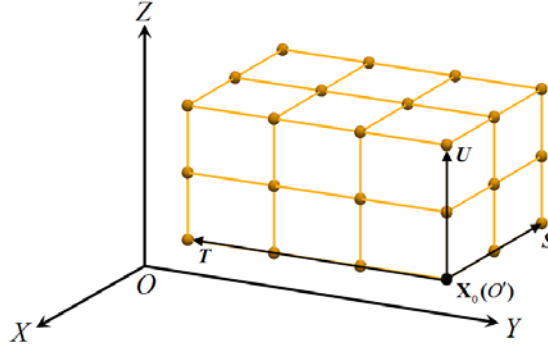


图 1 FFD 方法局部坐标系

其中 O' 为局部坐标系的原点， S, T, U 为局部坐标系下沿三个坐标轴的轴矢量。易知，如笛卡尔坐标系 O -XYZ 下的任一点 X 在局部坐标系中的坐标为 (s, t, u) ，则有：

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + s\mathbf{S} + t\mathbf{T} + u\mathbf{U} \quad (1)$$

其中 X_0 为局部坐标系中的原点， s, t, u 分别可表示为：

$$s = \frac{\mathbf{T} \times \mathbf{U} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{T} \times \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}}, \quad t = \frac{\mathbf{S} \times \mathbf{U} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{S} \times \mathbf{U} \cdot \mathbf{T}}, \quad u = \frac{\mathbf{S} \times \mathbf{T} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{S} \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{U}} \quad (2)$$

显然 s, t, u 的取值均介于 0 和 1 之间。

在长方体内构造控制顶点 $Q_{i,j,k}$ ：分别沿 S, T, U 三个方向用平行于 $O'TU, O'SU, O'ST$ 面的等距截面将 $O'S, O'T, O'U$ 等分为 l, m, n 个区间，如此，框架内任意点的笛卡尔坐标 X 可以用控制顶点表示为：

$$\mathbf{X}(s, t, u) = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,j}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) Q_{i,j,k} \quad (3)$$

由 (12) 式可知，初始船型网格节点是所有控制节点的线性函数。在建立了船的几何点与框架之间的关系后，我们将以部分控制节点的位置作为设计优化变量，通过控制框架的变形来达到船型变换的目标。假设原来控制框架内的任一点 X 的局部坐标为 (s, t, u) ，控制节点 $Q_{i,j,k}$ 的位置变化后得到新的控制节点 $Q'_{i,j,k}$ ，则点 X 也将移动到点 X_{ffd} ：

$$\mathbf{X}_{ffd} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,j}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) Q'_{i,j,k} \quad (4)$$

改变控制节点的移动数量，方向，大小，即可得到不同的新船体网格。

2.2 水动力性能评估方法

在此，我们需要评估的水动力性能有两个：在 $Fr=0.26$ 下的总阻力与桨盘面的伴流均匀度。其中，总阻力又可分为兴波阻力部分与粘性阻力部分，两部分分别计算，最终求和而得总阻力的大小。

2.2.1 求解兴波阻力

本文中我们应用 Neumann-Michell 理论来求解兴波阻力。这是一种改进的势流方法，只需在船体湿表面处做面积分即可。该方法的可用性已经在许多文献中做过验证^{[9][10]}，我们仅给出最终的计算表达式：

$$\tilde{\phi} = \tilde{\phi}_H + \tilde{\psi}^W \quad (5)$$

其中有：

$$\tilde{\phi}_H \equiv \int_{\Sigma^H} G n^x da - \int_{\Sigma^F} G \pi^\phi dx dy, \quad \tilde{\psi}^W = \int_{\Sigma^H} (\phi_t \mathbf{d}_* + \phi_d \mathbf{t}_*) \cdot \mathbf{W} da \quad (6)$$

上式中， \mathbf{d}_* ， \mathbf{t}_* ， t' ， d' 均是与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。

2.2.2 求解粘性阻力

我们利用 OpenFOAM 软件，采用基于 PIMPLE 算法的瞬态不可压缩牛顿湍流求解器 pimpleDyMFOam 对 KCS 船的叠模试验进行数值模拟。叠模的设计排除了自由面的影响，因此不能得到自由面的波形图，但也正由于此使得计算难度和计算量大大降低，使基于 CFD 的船型优化更具有可行性。另外，对于低速、肥大船来讲，兴波阻力对总阻力的影响并不十分显著，有时甚至会完全不计。考虑到本文的实际情况，为了能更加全面真实的给出对阻力性能的优化结果，船体兴波阻力由 NM 理论给出，粘性阻力（包括摩擦阻力和粘压阻力）由叠模计算给出。

2.2.3 求解桨盘面伴流均匀度

由 pimpleDyMFOam 的计算我们可以得到全流场的物理信息，为了考察桨盘面的伴流均匀度，我们需要提取桨盘面处的速度场，并按照（7）式得到伴流均匀度。 W 值越小，则越均匀，伴流性能越好。

$$W = \sqrt{\frac{\sum (U_x^i - \bar{U}_x)^2}{N \times \bar{U}_x^2}} \quad (7)$$

2.3 优化计算

在优化计算阶段，我们首先采用优化拉丁方方法（OLHS）进行试验设计，得到 40 组均匀散布在设计空间中的样本点，并依据试验设计点建立了克里格（Kriging）近似模型，以期在优化计算中用近似模型替代数值手段快速做出与船型对应的性能评估。又选取多目标遗传算法 NSGA-II 为优化方法，经过 500×300 个个体的演化，最终得到理想的优化方案。

3. KCS 船型优化算例

3.1 目标函数

本文的优化计算以 KCS 船为母型船，有 2 个目标函数：设计航速（ $Fr=0.26$ ）下的总阻力系数 C_t 与桨盘面伴流均匀度 W ，我们希望这两项指标越小越好。

$$f_{obj1} = \min \{C_t\}, \quad f_{obj2} = \min \{W\} \quad Fr = 0.26 \quad (8)$$

表 1 KCS 船模型参数

船型	航速 Fr	船长 L	船宽 B	吃水 D
KCS	0.26	7.36m	1.03m	0.346m

3.2 设计变量

优化变量用以控制船型在设计空间中的自由变化。本文的船型变换方法为 FFD 方法，涉及到两个 Lattice，（如图 2）分别将球鼻艏部分与船尾部分囊括在内，如此，我们便可以在优化过程中对 Lattice 框内的船体曲面进行变形。

从中归纳出 5 个优化设计变量 X1, Y1, Z1, Y2, Z2；前 3 个变量控制球鼻艏曲面在 x, y, z 三个方向上的变化，后 2 个变量控制船艉曲面在 x, y 方向上的变化。为了保证船型在合理范围内变动，规定各变量的取值范围如表 2。

表 2 优化变量取值范围

	Variables	Min	Max
Lattice-1	X1	-0.01	0.01
	Y1	-0.005	0.006
	Z1	-0.0065	0.0065
Lattice-2	X2	-0.007	0.007
	Y2	-0.01	0.012

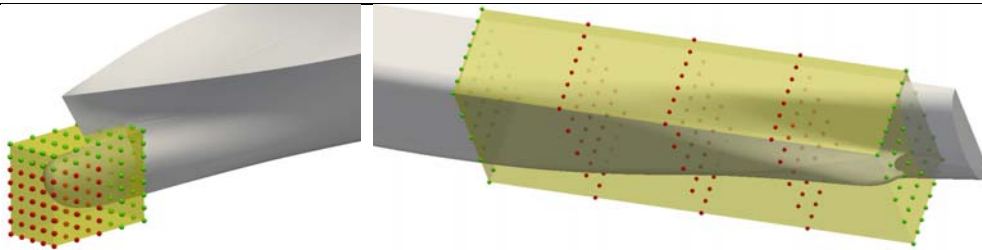


图 2 FFD 方法应用示意图（Lattice 及控制点布局）

3.3 优化结果与分析

我们首先利用优化拉丁方（OLHS）方法生成含有 40 个离散样本的集合，它们均匀的分布在可行解空间中；接着我们基于以上的集合建立克里格（Kriging）近似模型，在之后的优化计算中我们将利用近似模型来替代数值方法对某一船型方案的两种性能进行评估。我们选取多目标遗传算法 NSGA-II 为优化方法，计算了 500×300 个个体后得到优化结果。全部过程耗时约 36 小时。

在得到的 Pareto 解集中的每一种方案都是潜在的“最优解”，它们之间的区别在于不同解对两种性能（两个目标函数）的权衡。优化结果如图 3。其中，黑色五角星是 KCS 船的原始设计，紫色点代表优化计算中生成过的所有方案，黄色方点是从所有方案中筛选出的 Pareto 解。为了方便分析，我们从 Pareto 解集中仅选取一种方案进行验证，在图中标记为 Case-1。

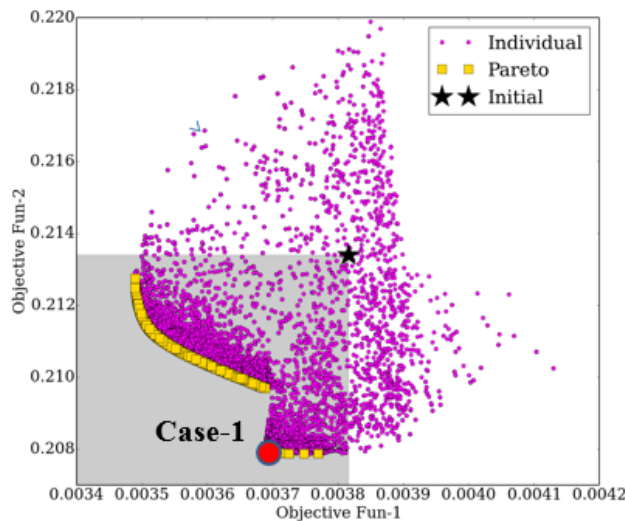


图 3 FFD 方法应用示意图（Lattice 及控制点布局）

表 2 Case-1 对应的优化结果

	$C_w (\times 10^{-3})$	$C_v (\times 10^{-3})$	$C_t (\times 10^{-3})$	伴流均匀度 W
初始船型	0.95	2.90	3.85	0.214
Case-1 船型	0.82	2.89	3.71	0.208
性能提高量	-	-	3.62%	2.80%

从优化结果可以看出，Case-1 船型在设计航速下的两个优化目标性能均有不同程度的提高，达到了良好的优化效果。从图 4 可以看出，相对于初始船型，Case-1 船型的首部和尾部都有变得更加“瘦”的趋势，而船体中部由于并未被 Lattice 划入，因此其几何形状维持不变。从图 5 和图 6 中可以看出，最优船型的兴波幅值减小，尾流场横波明显降低，表面压力幅值也有所减小，艏部高压区有明显改善，这都表明最优船型的阻力降低是合理有效的。另外，在图 7 中可以对比发现：Case-1 船型所对应的桨盘面伴流比原始设计更加均匀，新船伴流性能得到改善。

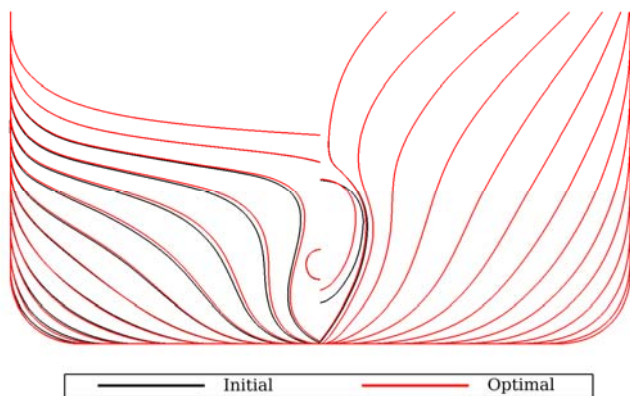


图 4 优化型线对比

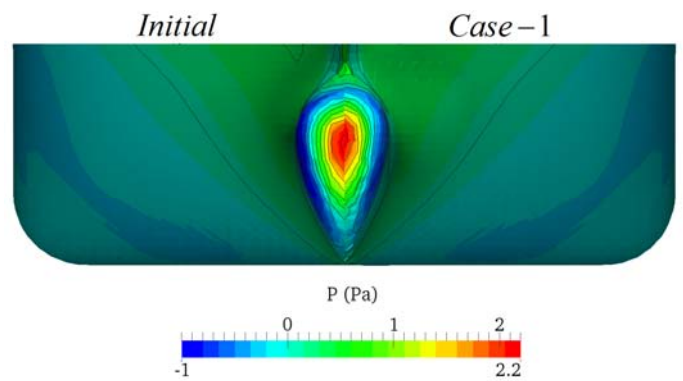


图 5 船舶表面压力对比

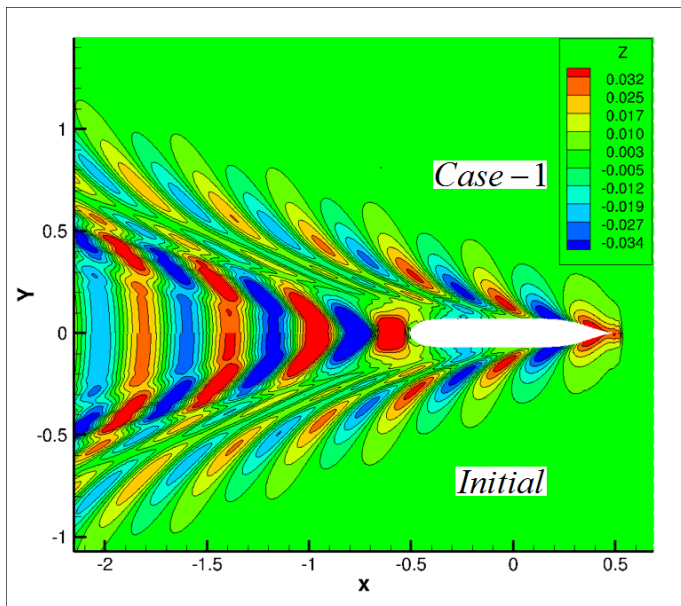


图 6 自由面兴波对比

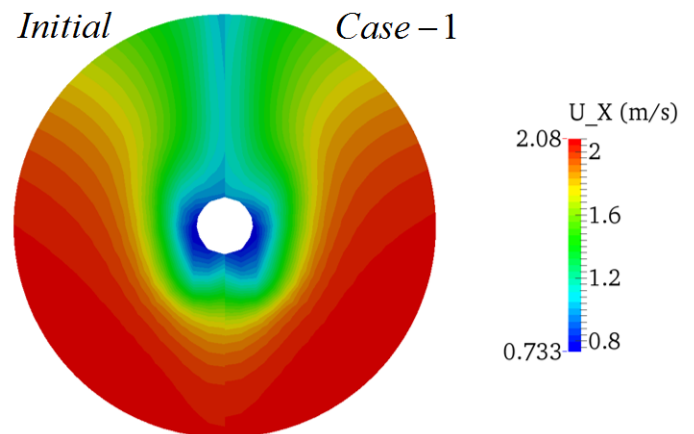


图 7 桨盘面伴流场对比

4. 结论

- (1) 本文以设计航速下的总阻力与桨盘面的伴流均匀度作为两个优化目标，利用 FFD 方法对球鼻艏与船艏部分的曲面实现变形，并进行了优化设计；

- (2) 本文的优化对象是标准船型 KCS, 我们利用优化拉丁方 (OLHS) 方法生成均匀分布的离散样本, 并基于此建立克里格 (Kriging) 近似模型, 选取多目标遗传算法 NSGA-II 为优化方法, 计算了 500×300 个个体后得到优化结果。取 Case-1 作分析, 发现阻力性能与伴流性能较之母型船分别提高了 3.62% 和 2.80%。
- (3) 本文初步尝试了基于 CFD 的船型优化, 由于采用了叠模的试验方法, 因此在一定程度上避免了由 CFD 计算所带来的巨大计算量。在下一步的工作中, 我们将通过开发新的工具、引入新的优化设计方法以实现基于 CFD 对船型耐波及阻力性能的优化。

5. 致谢

本文得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 1143200, 51579145, 11272120)、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)、工信部数值水池创新专项(2016-23/09)资助, 在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] Tahara Y, Peri D, Campana E F, Stern F. Single and multiobjective design optimization of a fast multihull ship: Numerical and experimental results[C]//27th Symposium on Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea, 2008: 25-33.
- [2] Tahara Y. Flow-and wave-field optimization of surface combatants using CFD-based optimization methods[C]//23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, September 17-22, Val de Ruil, 2000. 2000.
- [3] Peri D, Rossetti M, Campana E F. Design optimization of ship hulls via CFD techniques[J]. Journal of Ship Research, 2001, 45(2): 140-149.
- [4] Kim H, Yang C, Jeong S, Noblesse F. Hull Form Design Exploration Based on Response Surface Method[C]//21st International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui, USA, 2011: 816-827.
- [5] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 等. 基于 CFD 的船型自动优化技术研究 [C]//2008 年船舶水动力学学术会议暨中国船舶学术界进入 ITTC30 周年纪念会论文集. 2008.
- [6] 李胜忠. 基于 SBD 技术的船舶水动力构型优化设计研究[D]. 北京:中国舰船研究院, 2012.
- [7] 张宝吉, 马坤, 纪卓尚. 基于遗传算法的最小阻力船型优化设计[J]. 船舶力学, 2011, 15(4): 325-331.
- [8] 李胜忠, 倪其军, 赵峰, 刘卉. 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.
- [9] Noblesse F, Huang F, Yang C. The Neumann-Michell theory of ship waves[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2013, 79(1): 51-71.
- [10] Kim H, Yang C. Design Optimization of Bulbous Bow and Stern End Bulb for Reduced Drag[C]//23rd International Offshore and Polar Engineering Conference. Anchorage, USA, 2013.