

# 基于 NM 理论的船型优化技术应用

吴建威, 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)

**摘要:** 船型设计的优良与否直接关系到船舶的经济性与可用性, 因此船型优化技术已然成为一项研究热点。本文以数学船型 Wigley 为例, 首先利用平移法 (Shifting Method) 与径向基函数法 (Radial Basis Function Method, RBF Method) 变换船体曲面, 进而以基于 Neumann-Michell (NM) 理论所开发的求解器 NMSHIP-SJTU 计算兴波阻力系数。又以兴波阻力最小为优化目标, 选取遗传算法 (Genetic Algorithm) 为优化方法, 最终求解得到了在指定傅汝德数下兴波阻力最小的优化船型及相应阻力值, 并以基于 RANS 方程的 CFD 方法对优化结果进行了验证。对比与分析结果表明, 基于 NM 理论的计算能够满足船型优化的需求, 再与适当的船体曲面变形方法及优化方法协同配合, 能够形成具有实用价值的船型优化平台。这也为进一步改进和完善船型优化流程奠定了基础。

**关键词:** 船型优化; NMSHIP-SJTU; 平移法; 径向基函数法; 遗传算法; CFD

在船舶设计过程中, 型线设计至关重要。船型的优良与否直接影响到船舶的水动力学性能和营运经济效益。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关注的焦点问题之一。通常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。

伴随着计算机技术的蓬勃发展和计算理论不断完善, 集成了最优化算法和船舶性能数值预报的船型优化技术正逐步应用到船舶设计领域。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。Peri 等<sup>[1]</sup>以总阻力和船舶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。Tahara 等<sup>[2]</sup>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。Hyunyu<sup>[3]</sup>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。李胜忠<sup>[4]</sup>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%。兰亮<sup>[5]</sup>等以日本铃木和夫提出的船型修改函数变换船型, 又借助于 Dawson 方法和遗传算法分别进行阻力预报与优化计算, 也得到了良好的优化结果。

本文以总阻力最小为优化目标函数对数学船型 Wigley 船进行优化设计。利用平移法 (Shifting Method) 与径向基函数法 (Radial Basis Function Method, RBF Method) 修改船体曲面; 应用基于 NM (Neumann-Michell) 理论开发的求解器 NMSHIP-SJTU 计算船型阻力; 选取遗传算法 (Genetic Algorithm) 为优化方法, 最终求解得到了指定傅汝德数下阻力性能最佳的优化船型及阻力值, 并以基于 RANS 方程的 CFD 方法对优化结果进行了验证。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), 长江学者奖励计划(2014099), 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划(2013022), 国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目 (2013CB036103), 工信部高技术船舶科研项目的资助项目

**作者简介:** 万德成, 男, 教授, 博士生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学, 计算流体力学研究工作。  
E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

# 1 优化流程与方法

船型优化不是一蹴而就的，它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，优化算法的搜寻与筛选三个部分。流程图如图 1。

同时，优化流程中的各个环节都需要有高效而可靠的方法做支撑，这些方法将在本节中详细介绍。

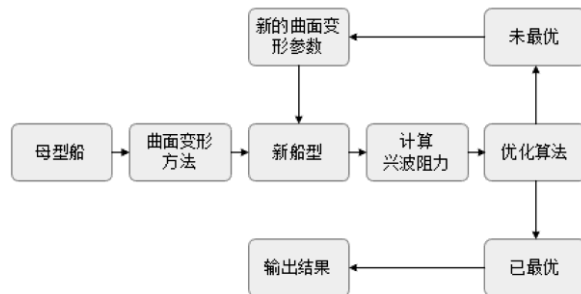


图 1 船型优化流程图

## 1.1 船型变换方法

以母型船表面上的若干离散点信息作为输入文件，以如下两种方法变换出新的备选船型。

### 1.1.1 基于平移法的整体船型变换

平移法是一种经典的船型变换方法，其基本思想是通过将母型船各站位的型线进行有序平移来获得新的船型。Hyunyu<sup>[3]</sup>等曾利用该方法对 S60 船进行变形优化。

在本文中，为了对接 NMSHIP-SJTU 求解器的求解需要，我们以母型船的表面网格为初始输入对象，因此之后的平移变换也是针对母型船表面的网格节点进行的。这样的处理不仅满足了船型变换后的计算需求，而且相比于修改母型船站位型线其变换精度更高。

为了使全船的变换协调连续，本文引入修改函数  $g$ ：

$$g = \begin{cases} \alpha_1 \left[ 0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_2}{\alpha_2 - x_1}) \right]^{0.5}, & x_1 \leq x \leq \alpha_2 \\ -\alpha_1 \left[ 0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_2}{\alpha_2 - x_2}) \right]^{0.5}, & \alpha_2 \leq x \leq x_2 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

平移变换法涉及四个变量： $x_1$ 、 $x_2$  分别为船体曲面变换区域的起始位置， $\alpha_1$  为变换的最大幅度， $\alpha_2$  为变换区域内不动点的位置。

基于修改函数，只需获取节点在船长方向上的初始位置即可求得该节点的平移矢量。平移法的特点是设计变量少，变换效率高，非常适用于对大范围内曲面（全船、半船）的整体修改。

### 1.1.2 基于 RBF 方法的局部船型变换

除了整体的变换，实现船体曲面的局部变换亦非常重要。Boer<sup>[6]</sup>等介绍了一种基于径向基函数（RBF）的曲面变形方法，本文将采用该方法对船体局部进行变形，并将其应用于优化设计过程中。

所有船体曲面的节点被划分为三类：

- 1) 固定不动的节点（固定控制点）；
- 2) 由优化设计参数控制移动的节点（移动控制点）；
- 3) 随控制点的移动而变动的其他节点。

基于此，定义位移函数  $s(\mathbf{X})$ ，用来表示船体表面每个节点  $\mathbf{X} = (x, y, z)$  的位移大小：

$$s(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_j\|) + p(\mathbf{X}) \quad (2)$$

上式中， $s(\mathbf{X})$ 被表示为  $N$  个径向基函数与一个多项式函数的和。其中， $N$  是所有控制点的个数； $\mathbf{X}_j=(x_j, y_j, z_j)$  为每个径向基函数的中心，也即  $N$  个控制点的坐标；基函数  $\phi$  是空间中任一点  $\mathbf{X}$  与函数中心  $\mathbf{X}_j$  的欧氏距离  $\|\mathbf{X}-\mathbf{X}_j\|$  的函数，本文中， $\phi(\|\mathbf{X}\|)=(1-\|\mathbf{X}\|)^4(4\|\mathbf{X}\|+1)$ ； $p$  为仿射变换的低阶多项式，此处的  $p$  可表示为： $p(\mathbf{X})=c_1+c_2x+c_3y+c_4z$ 。

要求解式 (2) 中的未知系数需两类控制点的位移关系式 (3)，以及附加条件式 (4)：

$$s(\mathbf{X}_j)=f_j, \quad j=1,2,\dots,N \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j p(\mathbf{X}_j)=0, \quad j=1,2,\dots,N \tag{4}$$

得到式 (2) 中的各个系数后，将所有网格节点坐标代入，即可得到相应网格节点的变形情况，从而完成船型变换。

本文中，上述基于 RBF 方法的船型变换模块将用于对船体首柱以及舷侧曲面的局部形状优化。

### 1.2 Neumann-Michell 理论

Neumann-Michell (NM) 理论<sup>[7]</sup>是由 Francis Noblesse 等学者在 Neumann-Kelvin (NK) 理论的基础上提出的一种势流理论。可用于快速预报船体在静水航行时的阻力与运动。

#### 1.2.1 NM 理论的表达式

NM 理论基于格林函数方法。从格林第二公式出发，我们首先得到边界积分表达式：

$$\tilde{\phi} = \int_{\Sigma_a^H} G n^x da - \int_{\Sigma_a^H} \phi \mathbf{n} \cdot \nabla G da + F^2 \int_{\Gamma} \frac{\phi G_x - G \phi_x}{\sqrt{(n^x)^2 + (n^y)^2}} n^x dl + \int_{\Sigma^F} (\pi^G \phi - G \pi^\phi) dx dy \tag{5}$$

其中  $F$  表示弗汝德数， $\pi^G$  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。

再利用协调线性理论模型与一系列数学变换，得到 NM 理论的最终表达式为：

$$\tilde{\phi} = \tilde{\phi}_H + \tilde{\psi}^W \tag{7}$$

其中有：

$$\tilde{\phi}_H \equiv \int_{\Sigma^H} G n^x da - \int_{\Sigma^F} G \pi^\phi dx dy \tag{8}$$

$$\tilde{\psi}^W = \int_{\Sigma^H} (\phi_i \mathbf{d}_* + \phi_{i'} \mathbf{t}_*) \cdot \mathbf{W} da \tag{9}$$

其中  $\mathbf{d}_*$ ， $\mathbf{t}$ ， $\mathbf{t}'$ ， $\mathbf{d}'$  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。

#### 1.2.2 NM 理论的验证

基于 NM 理论的阻力预报值既是方案筛选中的标杆，也是最终输出的结果。因此，为了得到理想的优化船型，首先需要对 NM 理论的预报可靠性进行验证。以下的例证为验证工作中的一部分。

我们以数学船型 Wigley 船为研究对象，利用基于 NM 理论的求解器 NMSHIP-SJTU 对其在 5 个傅汝德数  $Fr$  下的兴波阻力进行预报，并以 1957ITTC 摩擦阻力公式计算摩擦阻力，进一步将两者之和作为船体总阻力。NMSHIP-SJTU 的所有计算结果均与船模试验值进行比较。如图 2 所示。

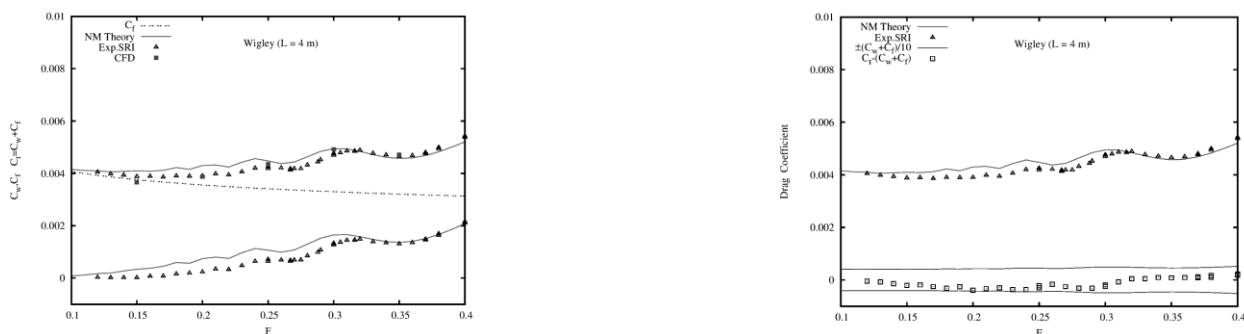


图 2 NM 预报总阻力系数与试验值的比较

由图2可知，与试验值相比，基于NM理论对Wigley船阻力的预报精度可以达到±10%。尽管与其他高精度的阻力预报方法相比，这样的结果并不是最突出。但从船型优化的实际需求来讲，±10%的误差已然可以接受，更重要的是：NM理论卓越的计算效率使大量生成备选船型-迅速计算-筛选-再大量生成新备选船型-再计算的优化流程成为可能。

### 1.3 遗传算法

#### 1.3.1 遗传算法的基本原理

遗传算法（Genetic Algorithms, GA）<sup>[8]</sup>是由Holland提出的一种模拟生物进化的优化算法。作为强有力且应用广泛的随机搜索和优化方法，遗传算法也许是当今最具影响的计算方法之一。本文的研究亦依托于此。

遗传算法以个体来表示问题的一个潜在解，在生成由一群个体组成的种群之后，个体将逐个被检验优劣，并冠以一定的适应度值。越是优秀的个体越容易将其“基因”（优化变量经过编码后的形式）遗传给下一代。父代种群中的优势个体经历变异、或者杂交的随机变换后产生数目相同的子代。经历若干代之后，算法收敛到最优个体，它往往对应着问题的最优解。

#### 1.3.2 遗传算法的验证

为了确保优化流程的可靠，我们针对遗传算法部分进行测试验证。本文选取一个具有一定复杂度的二维多峰函数，并基于遗传算法求解纯数值的函数优化问题。函数表达式为：

$$f(x, y) = -20 \times e^{-0.2 \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{2}}} - e^{\frac{\cos(2\pi x) + \cos(2\pi y)}{2}} + 20 + e, \quad -5 \leq x, y \leq 5 \quad (10)$$

该函数名为Alckley函数，是一非线性，对称，不可分离的多峰函数，它有许多局部最小值，但只有一个全局最小点，在点(0, 0)处，有值0达到最小。其几何特征如图3。

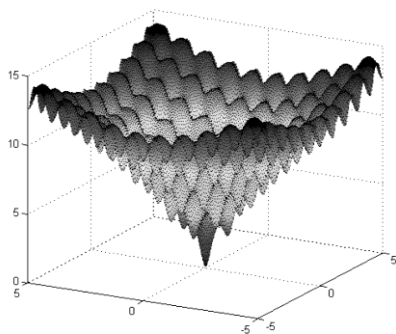


图3 Alckley函数示意

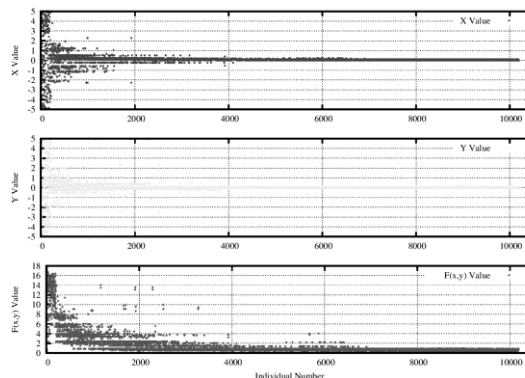


图4 遗传算法求解函数优化问题收敛过程

图4中展示了基于遗传算法求解Alckley函数最小值的优化过程，也即搜寻域内最小函数值点(0,0)。交叉率为0.85，变异率为0.05，经过200×100个个体的演变，最终x, y的取值都收敛到0.00488759，函数值收敛到0.0289106。若以计算值与解析值间的误差作比定义域、值域的范围来描述收敛的精确度，则优化变量的收敛精度达到万分之一量级，函数的收敛精度达到千分之一量级。由此观之，本文中使用的遗传算法是正确可靠的。这是完成船型优化流程的有力保障。

## 2 Wigley船优化算例

选取Wigley船作为优化对象，如图5所示。

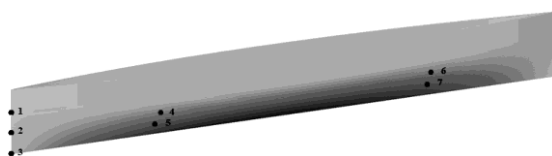


图5 Wigley船模及移动控制点分布

## 2.1 优化问题的定义

### 2.1.1 优化目标函数

本文的船型优化是以 Wigley 船在指定航速 ( $F_r=0.3$ ) 下的船舶兴波阻力系数最小作为优化设计目标, 目标函数如下:

$$f_{obj} = \min R_w, \quad F_r = 0.30 \tag{11}$$

在本文中, 遗传算法的种群数量设置为 30 个, 种群代数为 60 代, 即共完成 1 800 个个体计算。

### 2.1.2 几何变换方法及设计变量的定义

Wigley 全船的整体变换采用平移法实现。其中涉及 8 个设计变量: 前半船 (前 1/2 船长区域) 内的变换起止位置  $x_{1f}$ 、 $x_{2f}$ , 最大变换幅度  $\alpha_{1f}$ , 变换区域内不动点的位置  $\alpha_{2f}$ ; 后半船 (后 1/2 船长区域) 内的设计变量与之类似, 分别为  $x_{1a}$ 、 $x_{2a}$ ,  $\alpha_{1a}$ ,  $\alpha_{2a}$ 。在本文的计算中我们固定取  $x_{1f}$  为 0.5,  $x_{2f}$  为 0,  $x_{1a}$  为 0,  $x_{2a}$  为 -0.5, 因此设计变量退化为 4 个。

同时我们采用基于径向基函数 (RBF) 的方法实现船体首柱, 以及 1/4、3/4 船长处的舷侧曲面的局部形状变化。为了保证变换前后的船型主尺度不发生修改, 固定控制点选为 Wigley 船中纵剖面、中横剖面和甲板边线上的点。移动控制点选为 1~7 号点, 其中 1, 2, 3 点控制船首的局部变化, 4~7 号点控制舷侧的局部变化, 移动控制点的分布如图 5 所示。

### 2.1.3 约束条件

设计变量的约束条件如表 1 所示。其中的约束范围均是相对于船长的无因次量。定义  $x$  沿船长方向, 指向船首为正;  $y$  沿船舷侧方向, 指向左舷为正。

表 1 设计变量的约束条件

几何变换方法	设计变量	变化方向	约束范围	设计变量	变化方向	约束范围
平移法	$\alpha_{1f}$	—	[-0.003, 0.003]	$\alpha_{2f}$	—	[0.2, 0.3]
	$\alpha_{1a}$	—	[-0.003, 0.003]	$\alpha_{2a}$	—	[-0.3, -0.2]
RBF 方法	#1	$x$	[-0.002 5, 0.002 5]	#4	$y$	[-0.002 5, 0.002 5]
	#2	$x$	[-0.002 5, 0.002 5]	#5	$y$	[-0.002 5, 0.002 5]
	#3	$x$	[-0.002 5, 0.002 5]	#6	$y$	[-0.002 5, 0.002 5]
				#7	$y$	[-0.002 5, 0.002 5]

## 2.2 优化设计结果

关于遗传算法的参数设置及优化用时如表 2; 最优解对应的目标函数及设计变量值如表 3。优化过程中兴波阻力系数值 (目标函数) 的变化收敛如图 6 所示; 优化前后的型线对比如图 7 所示; 图 8 中对比了优化前后船型的自由面兴波状况; 图 9 对比了优化前后船型的表面压力分布。

表 2 遗传算法参数及优化用时

种群个体个数	30	交叉概率	0.85
遗传代数	60	变异概率	0.05
使用节点数	4	优化用时 (h)	20

表 3 最优解对应的目标函数及设计变量值

几何变换方法	设计变量	收敛值	设计变量	收敛值
平移法	$\alpha_{1f}$	0.002 760	$\alpha_{2f}$	0.263 343
	$\alpha_{1a}$	0.002 097	$\alpha_{2a}$	-0.224 927
RBF 方法	#1	0.001 997	#4	-0.002 373
	#2	0.002 011	#5	-0.002 427
	#3	0.003 495	#6	-0.002 295
			#7	-0.001 483
初始目标函数值		$1.619 \times 10^{-3}$	收敛目标函数值	$8.563 \times 10^{-4}$

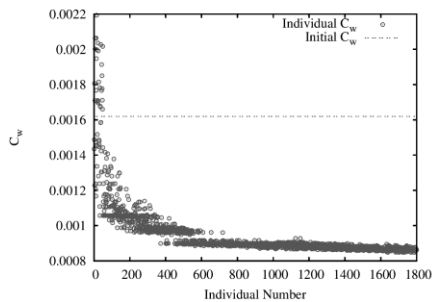


图 6 兴波阻力系数收敛过程

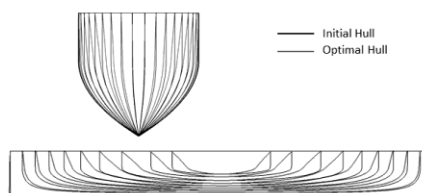


图 7 优化前后船体型线

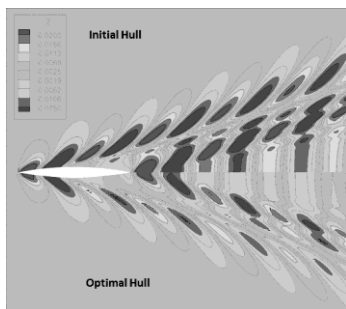


图 8 自由面兴波对比



图 9 船体表面压力分布对比

### 2.3 对优化设计结果的 CFD 验证

为了进一步验证以上的优化结果，我们采用基于 RANS 方程的 CFD 方法分别对母船型和优化船型进行了阻力计算。计算中我们采用了基于开源 CFD 软件 OpenFOAM 开发的船舶海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU，关于这一求解器的可靠性在之前的文献<sup>[9]</sup>中已做验证。优化验证结果如表 4，基于 CFD 方法求解的自由面兴波对比如图 10。

表 4 CFD 方法验证优化结果

计算方法	船型	$C_w$	$C_f$	$C_t$	阻力下降/(%)
NM+1957 ITTC 公式	母船型	0.001 619	0.003 300	0.004 919	15.52
	优化船型	0.000 856	0.003 300	0.004 157	
计算方法	船型	$C_p$	$C_f$	$C_t$	阻力下降/(%)
CFD	母船型	0.001820	0.003 067	0.004 886	12.72
	优化船型	0.001 136	0.003 128	0.004 264	

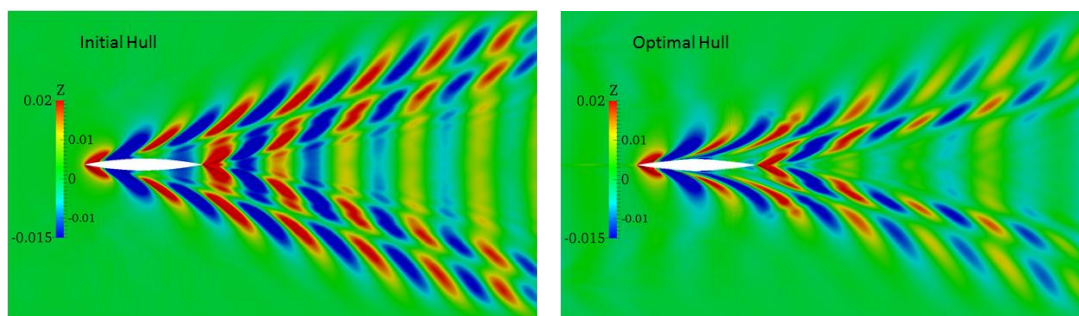


图 10 基于 CFD 计算的自由面兴波对比

## 2.4 分析与结论

通过以上的计算与对比我们可以得出以下结论:

1) 基于 NM 理论的船型优化技术是有效的。它能在较短的时间内迅速搜索到最优解,在保持船体主要尺度特征不变的前提下大幅降低兴波阻力。特别对于兴波阻力突出的高速船舶,这是大有裨益的。

2) 基于 NM 理论的船型优化技术是可靠的。我们运用 CFD 方法计算并对比了优化前后的两型船。由表 4 可知,由 NM 理论与 ITTC 公式结合给出的总阻力系数与由 CFD 方法预报的阻力系数结果相比非常吻合,并且,两种方法对优化船型阻力下降程度的计算结果也比较接近。

3) 通过对船体周围流场信息的后处理,我们能更清晰地了解兴波阻力降低的机理性原因。优化船型与母型船相比,船艏部向前突出,船舷侧靠近船底的部分变消瘦。由图 8、9、10 可知,这些变化首先降低了船首的兴波波幅,其中又以船舷横波的降幅更明显,这直接影响了船尾之前的船体表面上的压力分布,如图 9 所示,母型船船艏之前的负压区在优化船型上不复存在,这对减小首尾压差、降低兴波阻力意义重大。其次,图 8、10 显示:船艏压力兴波,尤其是船舷横波的波幅也大大减小。从能量传递角度来看,波浪运动所具有的能量都是缘于船体运动的能量传递,自由面的兴波波幅整体减小意味着船体在水面损失的运动能更少,因此兴波阻力会降低,这样的分析结果与计算结果是定性吻合的。

## 3 结 语

以总阻力最小为优化目标函数对傅汝德数  $F_r = 0.3$  下的数学船型 Wigley 进行优化设计。我们利用平移法(Shifting Method)与径向基函数法(Radial Basis Function Method, RBF Method)修改船体曲面;应用基于 NM(Neumann-Michell)理论开发的求解器 NMSHIP-SJTU 计算船型阻力;选取遗传算法(Genetic Algorithm)为优化方法,经过 20 个小时的计算,最终求解得到了指定傅汝德数下阻力性能最佳的优化船型及阻力值:在保持船体主要尺度特征的前提下兴波阻力降低了 47.1%,总阻力降低了 15.5%。最后我们又运用基于 RANS 方程的 CFD 方法对优化结果进行了验证计算,计算结果与基于 NM 的优化结果吻合良好,验证了基于 NM 理论的船型优化技术的可靠性。

在下一步的研究中,我们将引入新的曲面变形方法,如 FFD 自由变形方法、基于贝齐尔面片的方法等。将引入针对多目标点的优化算法,并针对多种船型开展优化,最终形成具有实用价值的船型优化平台。

## 参考文献

- 1 Peri D, Rossetti M and Campana E F. Design optimization of ship hulls via CFD techniques[J]. Journal of Ship Research, 2001, 45(2): 140-149.
- 2 Tahara Y and Peri D, Campana E F and 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.
- 3 Kim H, Yang C, Jeong S and Noblesse F. Hull form design exploration based on response surface method[C]. Proceedings of the Twenty First (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui, USA, 2011, 816-827.
- 4 李胜忠.基于 SBD 技术的船舶水动力构型优化设计研究[D]. 武汉: 中国舰船研究院, 2012.
- 5 兰亮.船舶兴波阻力计算及型线优化[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.
- 6 De Boer A, Van der Schoot M S and Bijl H. Mesh deformation based on radial basis function interpolation[J]. Computers & structures, 2007, 85(11): 784-795.
- 7 Noblesse F, Huang F and Yang C. The Neumann-Michell theory of ship waves[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2013, 79(1): 51-71.
- 8 Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- 9 Ye H X, Shen Z R and Wan D C. Numerical prediction of added resistance and vertical ship motions in regular head waves[J]. Journal of Marine Science and Application, 11(4): 410-416.
- 10 Zha R S, Ye H X, Shen Z R and Wan D C. Numerical study of viscous wave-making resistance of ship navigation in still water[J]. Journal of Marine Science and Application, 2014, 13(2): 158-166.