

基于遗传算法与 NM 理论的船型优化

刘晓义, 吴建威, 赵敏, 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: 阻力性能的优化一直是船舶设计工作的重要环节, 它将直接决定船舶的经济性和可用性。本研究工作是基于 Neumann-Michell(NM)理论和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)进行的, 以标准船型 Series60 为例, 利用平移法(Shifting Method)与径向基函数法(Radial Basis Function Method, RBF)修改船体曲面, 将兴波阻力作为目标函数, 对高航速($Fr=0.30$)下的 Series60 船型进行优化。最终得到能使兴波阻力有效减小的优化船型, 并对优化船型做了分析。

关键词: 船型优化; 兴波阻力; NMSHIP-SJTU; 遗传算法

1 引言

船体型线设计是船舶设计过程中的重要环节, 其设计水平将直接影响到船舶的水动力性能、综合航行性能和经济营运效益等。随着船舶行业的不断发展, 如何得到具有更优性能的船体型线已经成为船舶设计者亟须解决的问题。传统的型线设计方法往往是通过经验丰富的船舶设计人员不断地修改母型船, 经过模型试验, 对所有的设计方案进行验证, 并从中选择最优的设计方案, 以此作为改进的新船型。这样的设计方法不仅对设计人员提出了很高的要求, 效率和经济性也较低, 还很难得到最优的设计方案。正因如此, 船形优化设计方法需要进行全面改进。

近些年来, 计算机性能的提升以及计算流体力学的蓬勃发展, 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。该设计模式现在已经大规模应用于船型优化设计领域, 并取得了丰富的成果。Tahara 等^[1]通过参数模型法, 引入 6 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^[2]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(Bezier Patch)方法实现船体曲面重构, 利用计算流体力学(Computational

Fluid Dynamics, CFD) 方法预报船舶阻力与运动, 又分别基于三种不同的优化算法变梯度法, 序列二次规划, 最速下降法进行优化计算, 同时通过模型试验对优化结果进行了验证。Peri 等^[3]为了解决数值模拟耗时长、耗费高的弊端, 将近似技术引入基于 CFD 的船型优化当中, 并对 RSM、VFM、Kriging、RBF 等近似模型分别进行了研究, 得到了详细的分析结果。冯佰威等^[4]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。张宝吉等^[5]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。

本文以兴波阻力最小为优化目标函数对标准船型 Series 60 进行优化设计。我们利用平移法与径向基函数法修改船体曲面; 应用基于 NM 理论开发的求解器 NMShip-SJTU 计算船型阻力; 选取遗传算法为优化方法, 求解得到了指定傅汝德数下兴波阻力最小的优化船型, 并对优化结果进行了分析。

2 Neumann-Michell 理论

Neumann-Michell 理论^[6]是由 Francis Noblesse 等学者在 Neumann-Kelvin (NK) 理论的基础上提出来的。NM 理论成功消去了 NK 理论中原有的沿船舶水线的积分项, 将全部的计算转化为在船体湿表面上的积分。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。

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 $\phi \equiv \Phi/(V_s L_s)$ 。从格林第二公式出发, 我们首先得到边界积分表达式:

$$\tilde{C} \tilde{\phi} = \int_{\Sigma} (G \mathbf{n} \cdot \nabla \phi - \phi \mathbf{n} \cdot \nabla G) da \quad (1)$$

格林函数 G 的值在远场中迅速衰减, 再结合船体是表面处的不可穿透边界条件 $\mathbf{n} \cdot \nabla \phi = n^x$, 并忽略了自由表面升高中的非线性项, 可以得到:

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

其中 F 表示傅汝德数, π^G 和 π^ϕ 的定义为: $\pi^G \equiv G_z + F^2 G_{xx}$, $\pi^\phi \equiv \phi_z + F^2 \phi_{xx}$, Γ 代表平均水线。

对于协调线性理论模型, (2) 式中在船体真实湿表面积上对源强的积分项可以写成:

$$\int_{\Sigma_H} G n^x da \approx \int_{\Sigma_H} G n^x da + F^2 \int_{\Gamma} \frac{G \phi_x n^x dl}{\sqrt{(n^x)^2 + (n^y)^2}} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 两式中的水线积分项部分抵消, 并将格林函数 G 分解为兴波部分 W

与当地流动部分 L 两部分, 又经过一系列数学变换, 得到 NM 理论的最终表达式为:

$$\tilde{\phi} = \tilde{\phi}_H + \tilde{\psi}^W \quad (4)$$

其中有:

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

$$\tilde{\psi}^W = \int_{\Sigma^H} (\phi_t \mathbf{d}_t + \phi_d \mathbf{t}_d) \cdot \mathbf{W} da \quad (5)$$

其中 \mathbf{d}_t , \mathbf{t}_d , 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。

3 船型变换方法

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研究对象, 因此我们的平移也是针对母型船表面的网格节点进行的。

3.1 基于平移法的整体船型变换

为了使全船的变换协调连续, 本文引入修改函数 g :

$$g = \begin{cases} \alpha_1 \left[0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_2}{\alpha_2 - x_1}) \right]^{0.5}, & x_1 \leq x \leq \alpha_2 \\ -\alpha_1 \left[0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_2}{\alpha_2 - x_2}) \right]^{0.5}, & \alpha_2 \leq x \leq x_2 \\ 0, & elsewhere \end{cases} \quad (6)$$

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, α_1 为变换的最大幅度, α_2 为变换区域内不动点的位置。为限制船型变化幅度, 本文算例中的 α_1 的范围设置为 $[-0.005, 0.005]$ 。

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。平移法的特点是变量少, 变换效率高, 非常适用于对大范围曲面的整体修改变换。

3.2 基于 RBF 方法的局部船型变换

为了实现船体曲面的局部变换, 国内外的学者都对此开展了一些尝试。其中, Boer^[7] 介绍了一种基于径向基函数的曲面网格变形方法, 该方法在处理网格变形时简单有效, 因此受到优化研究者的关注。本文在进行船体局部变形时, 将整个船体曲面离散成若干三角形面元及面元上的节点。整个船体曲面的节点被划分为固定控制点、移动控制点, 以及随

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:

$$s(X) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(\|X - X_j\|) + p(X) \quad (7)$$

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, 包括固定控制点和移动控制点, $\mathbf{X}_j=(x_j, y_j, z_j)$ 表示每个径向基函数的中心, 也就是 N 个控制点的坐标, 基函数 ϕ 是空间中任一点 \mathbf{X} 与函数中心 \mathbf{X}_j 的欧氏距离的函数, 本文选择如下具有紧支性的 Wendland's 基函数:

$$\phi(\|X\|) = (1 - \|X\|)^4 (4\|X\| + 1) \quad (8)$$

式(7)中的多项式 p 为仿射变换的低阶多项式:

$$p(X) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 z \quad (9)$$

式(7)中的系数 λ_j 以及式(10)中的 c_j 可以通过两类控制点的位移求解得到:

$$s(X_j) = f_j, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

上式中, f_j 表示每个控制点的位移值, 同时附加条件:

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j p(X_j) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

可以得到如下线性方程组:

$$\begin{pmatrix} f \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M & P \\ P^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ c \end{pmatrix} \quad (12)$$

其中,

$$\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N]^T; \quad c = [c_1, c_2, c_3, c_4]^T; \quad f = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T; \quad (13)$$

$$M_{i,j} = \phi(\|X_i - X_j\|), \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

$$P_{i,j} = p_j(X_i), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

至此, 我们只需求解线性方程组(12), 即可得到式(7)中的各个系数, 并将所有网格节点坐标代入(7), 就可以得到所有网格节点的变形情况, 从而完成船型变换。

4 serires 60 船型优化算例

4.1 目标函数

本文的船形设计优化是基于船舶的兴波阻力进行的, 目标函数即指定航速下的船舶兴

波阻力:

$$f_{obj} = \min R_w, \quad Fr = 0.30 \quad (16)$$

本文设计的遗传算法中种群数量设置为 30, 设置的终止条件为种群代数达到 36 代, 即共完成 1080 个个体计算。

表 1 Series 60 模型参数

船型	航速 Fr	船长 L	船宽 B	吃水 D
Series 60	0.30	1.00m	0.13m	0.05m

4.2 设计变量

本算例的优化设计是基于上文中的两种船型变换方法进行的, 共有九个设计变量: α_{1f} , α_{2f} , α_{1a} , α_{2a} , f_1 , f_2 , f_3 , f_4 , f_5 。其中 α_{1f} , α_{2f} , α_{1a} , α_{2a} 分别为 3.1 中所述船型变换参数, 下标 f 代表前半体, a 代表后半体; f_j 分别为五个控制点的移动距离。如图 1 所示, 控制点均位于船体首部, 控制点 1-4 只沿船长方向移动, 控制点 5 只沿船宽方向移动。

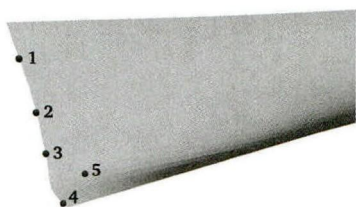


图 1 控制点示意图

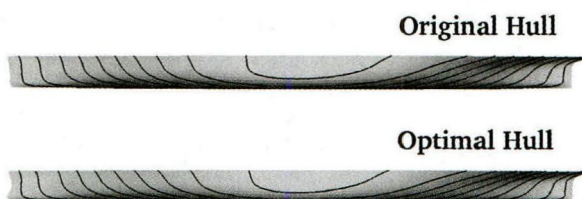


图 2 优化型线对比

4.3 优化结果与分析

经过遗传算法的 36 代迭代, 优化船型的兴波阻力系数基本收敛, 兴波阻力系数变化如图 3 所示, 优化结果如下表:

表 2 优化结果

	兴波阻力系数/ $\times 10^{-3}$	湿表面积/ m^2	排水体积/ m^3
初始船型	2.00236	3.40952	0.00424552
最优船型	1.72281	3.40546	0.00424318
改变量	-13.96%	0.19%	-0.06%

从优化结果可以看出, 最优船型在该航速下的兴波阻力系数有明显降低, 而湿表面积与排水体积基本不变, 说明我们的最优船型在基本保持初始船型特征的基础上, 整体和局部较小的变化有效改善了其兴波阻力。

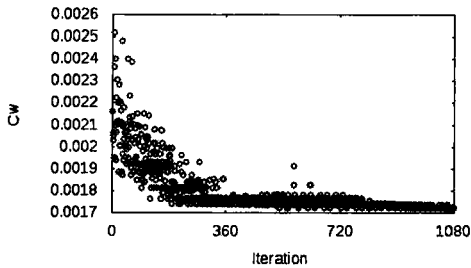


图3 兴波阻力系数迭代

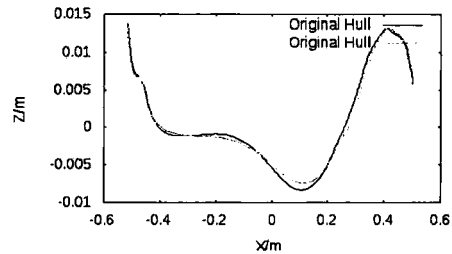


图4 表面兴波高度对比

从图5可以看出,优化船型的尾流场有一定改善,横波明显减小,结合图4中兴波高度的降低,说明优化后的船型兴波阻力降低时合理有效的。图6的船体表面压力同样表明其压力幅值有所减小,尤其是首部高压区和船中低压区有明显改善。

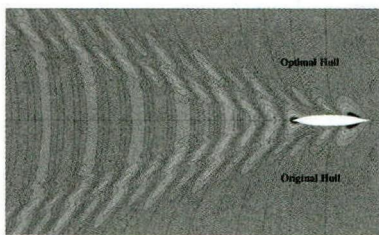


图5 自由面兴波对比

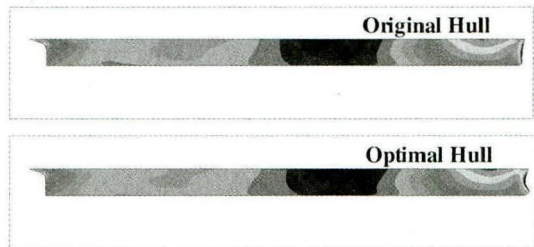


图6 船体表面压力对比

5 结论

本文采用 NMSHIP-SJTU 计算船体兴波阻力,以此作为优化目标,利用平移法与基于径向基函数的船型变换方法,对标准船型 Series 60 的整体型线以及首部型线进行了优化设计。通过遗传算法优化后的最优船型,与初始船型相比,其高航速 ($Fr=0.30$) 下的兴波阻力系数下降了 13.96%。本文成功实现了基于 NM 理论的船体型线设计优化,以后的研究中应当对其他船型及航速进一步验证,由于 NM 理论只能预报船舶兴波阻力,未来还应考虑针对船舶总阻力的优化设计。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (Grant Nos 51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), 长江学者奖励计划 (Grant No. 2014099), 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划 (Grant No. 2013022), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (Grant No. 2013CB036103), 工信部高技术船舶科研项目的资助。在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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.
- 3 Peri D, Campana E F. Variable fidelity and surrogate modeling in simulation-based design[C]//27th Symposium on Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea. 2008.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 Noblesse F, Huang F, Yang C. The Neumann-Michell theory of ship waves[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2013, 79(1): 51-71.
- 7 De Boer A, Van der Schoot M S, Bijl H. Mesh deformation based on radial basis function interpolation[J]. Computers & structures, 2007, 85(11): 784-795.

Ship hull optimization design based on NM Theory and GA Method

LIU Xiao-yi, WU Jian-wei, ZHAO Min, WAN De-cheng*

(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)

*Corresponding author, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: Resistance of performance optimization has always been an important part of ship conceptual design, for its direct demonstration to economy and usability of the ship. The paper is based on Neumann-Michell (NM) theory proposed by Francis Noblesse and genetic Algorithm (GA). We take the standard ship Series60 for an instance. By using the Shifting Method and Radial Basis Function Method to modify the hull surface, minimizing the wave drag as the objective function, the Series60 ship form is optimized under the high speed ($Fr = 0.30$). Finally the optimal hull design with low wave drag has been got. And further analysis is drawn in the last.

Key words: ship hull optimization; wave drag; NMShip-SJTU; GA