

基于 Neumann-Michell 理论的双体船水动力学性能多目标优化

缪爱琴, 刘晓义, 吴建威, 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: OPTShip-SJTU 软件是一种基于水动力学性能开发的多目标船型优化工具, 由船型变换模块, 水动力学性能评估模块和优化模块三部分组成。本文采用 OPTShip-SJTU 软件对双体船 Delft 372 进行水动力学性能优化, 采用 FFD (自由曲面变形技术) 对该船两个片体局部进行参数化船型变换来产生一系列新的实际船型, 采用 Neumann-Michell 理论来预报系列船型的兴波阻力系数 ($Fr=0.5, 0.7$), 考虑片体间距对阻力的影响, 最终采用多目标遗传算法——NSGA-II 来完成船型优化。同时为了节省计算时间, 采用近似技术——Kriging 模型构造设计变量和目标函数之间的关系, 可以更快速地获得优化进程中各船型的目标函数值 (在误差允许范围内)。本文最终获取了以 Delft 372 为母型船, 兴波阻力系数降低的改良船型。

关键词: OPTShip-SJTU; 多目标优化; 双体船; 水动力学性能

Hull form multi-optimization based on Neumann-Michell theory for a catamaran

Miao Ai-qin, Liu Xiao-yi, Wu Jian-wei, 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, Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

Abstract: OPTShip-SJTU software is a hull form optimization tool based on hydrodynamic performance, which is combined by three modules—Hull form modification, hydrodynamic performance prediction and optimization modules. Here it is used to optimize hull form of a catamaran—Delft 372, to improve its resistance performance. Especially the distance between two sides is considered as one of the design variables. The Free Form Deformation (FFD) method adopted for automatically modifying the hull form are illustrated. Neumann-Michell theory is applied to evaluate the wave-making resistance coefficients (at $Fr = 0.5, 0.7$) of a series of hull form yielded during the optimization process. In addition, NSGA-II, a multi-objective genetic algorithm, is implemented to produce pareto-optimal front. In order to reduce the overall highly computational effort, the Kriging surrogate model is established based on the samples produced by OLHS method and is used to directly predict the objective functions. In the present paper a catamaran, Delft 372, is chosen as initial ship and optimal solutions with obvious wave-making resistance coefficient reductions at specific speeds (at $Fr=0.5, 0.7$) are obtained.

Keywords: OPTShip-SJTU, multi-optimization, catamaran, hydrodynamic performance

1 引言

高速双体船因其在快速性方面的突出优点，目前已广泛占领高性能船舶市场，据不完全统计，目前高速双体船在高性能船舶市场占有率达 40% 以上，高居高性能船的首位。其中，船舶快速性的优劣是决定船舶能耗水平的关键所在。快速性又细分为船舶阻力性能和推进性能，降低船舶阻力和提高船体推进效率都能起到节能降耗的作用。目前，为了降低船舶的营运能耗，许多举措被提出并逐步付诸实践：优化船体型线设计，加装船舶节能装置（能量回收装置），合理规划船舶运动姿态、速度等等。一个合理的船体型线设计，将会大大提高船舶的快速性。近些年来，随着计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）的发展和计算机科学的进步，一些学者开始了基于计算流体力学的船舶选型优化设计[1]-[4]，这样的优化设计在一定程度上降低了模型试验的成本，提高了优化效率。基于水动力性能的船型优化软件 OPTShip-SJTU 是基于对船型变形方法，试验设计方法，近似模型技术，优化算法，Neumann-Michell 理论而开发的。其包含三大重要模块：船型变换，水动力性能评估，优化模块，如图 1。

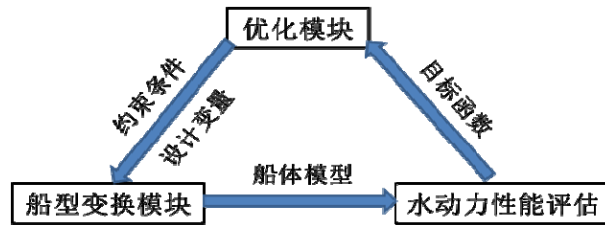


图 1 船型优化流程图

本文采用 OPTShip-SJTU 软件对一艘高速双体船船模 Delft 372 进行船型优化，包含四个设计变量，其中三个控制船型变换，第四个是船体间距参数。以兴波阻力系数 ($Fr=0.5, 0.7$) 为目标函数，采用 FFD（自由曲面变形技术）对船型进行变换，采用 NSGA-II 算法进行快速优化，最终选择一系列优化船型中的一个（命名为 Delft-opt）进行对比分析。

2 自由曲面变形方法（FFD）

船型变换模块是联系船舶性能评估模块与优化模块的桥梁和纽带，是船型优化流程中的关键环节。每当优化模块对设计优化变量重新进行取值，船型变换模块需要针对新的一组设计优化变量做出快速响应，即生成与该组变量相对应的船体三维几何表达形式，并送交船舶水动力性能求解模块进行求解评估，评估结果将进一步影响优化模块对设计变量的下一次搜索。

本文采用的自由曲面变形方法——FFD（Free-Form Deformation）方法是由 Sederberg 和 Parry 在 1986 年提出的一种网格自由变形方法[5][6]。已经被广泛应用于包括船舶几何重构在内的各个领域。其基本思想如下：

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 2 所示：

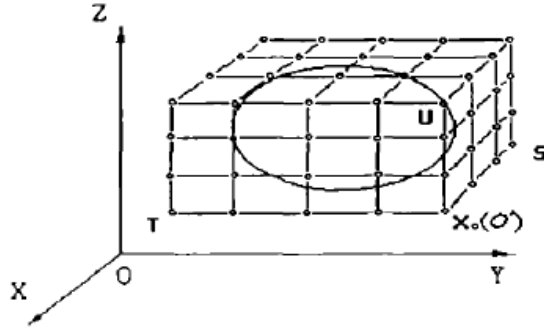


图 2 FFD 方法局部坐标系

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 \mathbf{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 $\mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{U}$ 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, 则 $Q_{i,j,k}$ 可表示为:

$$Q_{i,j,k} = O' + \frac{i}{l}\mathbf{S} + \frac{j}{m}\mathbf{T} + \frac{k}{n}\mathbf{U} \quad (3)$$

$$i = 0, 1, \dots, l; \quad j = 0, 1, \dots, m; \quad k = 0, 1, \dots, n;$$

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:

$$\mathbf{X}(s, t, u) = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,j}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) Q_{i,j,k} \quad (4)$$

其中 B 代表 Bernstein 多项式基函数, 定义为:

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (5)$$

由 (4) 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} :

$$\mathbf{X}_{ffd} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,j}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) Q'_{i,j,k} \quad (6)$$

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。

3 双体船兴波阻力理论

单个片体的波系干扰,如同常规单体船一样,仅发生于自身的首横波系和尾横波系之间。首横波系传到船尾时,与船尾横波相叠加,若两波的位相相同,使合成的横波波幅加大,则兴波阻力增加,称为不利干扰;若两波的位相相反,则合成波的波幅减小,兴波阻力减少,称为有利干扰。亦即,双体船的附加兴波干扰阻力与片体间距有关,片体间距决定了两个片体间散波交汇点的位置及横波的重迭程度。因此,双体船两片体之间的相对距离是双体船设计的重要船型参数[7]。

船舶水动力性能分析模块可以预报船舶的静水兴波阻力系数,本文对于兴波阻力系数的预报是基于 Neumann-Michell (NM) 理论[8][9]。NM 理论是由 Francis Noblesse 等学者在 Neumann-Kelvin (NK) 理论的基础上提出来的一种势流理论。可用于快速预报船体在静水航行时的阻力与运动。NM 理论具有一定的预报精度,尤其对兴波阻力随船型与速度不同而呈现出的变化趋势有较为准确的判断,而且基于 NM 理论的预报效率很高,这些特性与优化流程中对船型性能分析模块的需求都非常契合。相关 NM 理论的应用已经有很多文章介绍[10],这里不赘述。

4 优化问题

4.1 优化对象

本文采用荷兰代尔夫特大学 Delft 372 双体船作为母型船,对其进行优化设计。图为横剖线图和纵剖线图,图 4 为三位表为其主尺度,

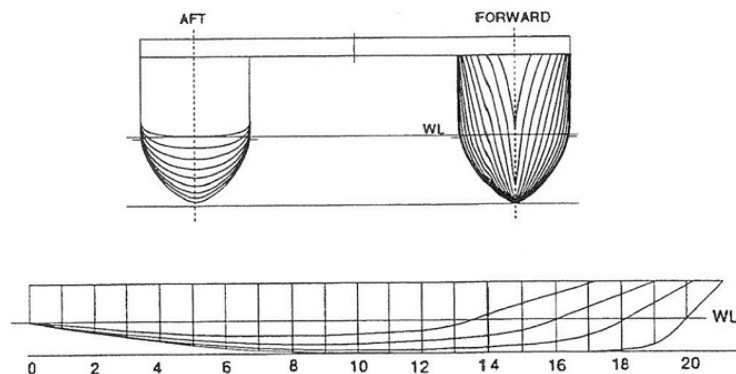


图 3 Delft 372 型线图

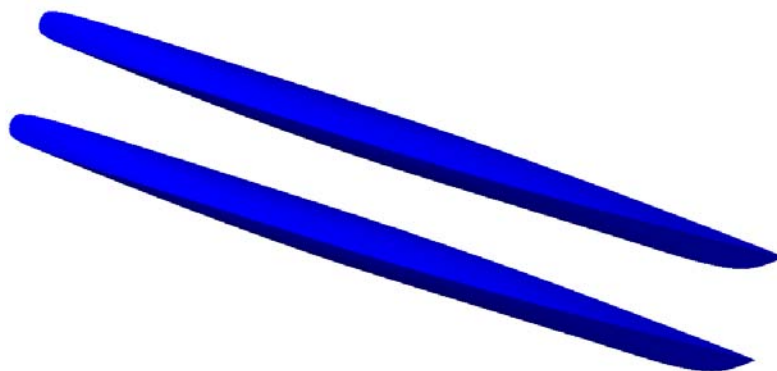


图 4 Delft 372 三维图

表 1 Delft 372 模型主尺度

主尺度	符号	数值
-----	----	----

垂线间长	L _{pp}	3.00m
总船宽	B	0.94m
片体船宽	b	0.24m
片体中心间距	H	0.70m
吃水	T	0.15m
排水量	Δ	87.07Kg
重心垂向坐标	KG	0.34m
重心纵向坐标	LCG	1.41m
惯性矩	I	53.245Kg ²

4.2 多目标函数及设计变量

该船型优化问题的目标函数是 Delft 372 静水中航行的兴波阻力系数 (Fr=0.5,0.7) 船模尺寸为 3m。

$$C_w = \frac{R_w}{0.5\rho U^2 S} \quad (7)$$

船型变化区域仅在船前半体部分 (x=0.3L~0.5L) 如图 5, 基于 FFD 方法所施加的控制点如图 6, 其中红色点表示可动点, 绿色点表示固定点。

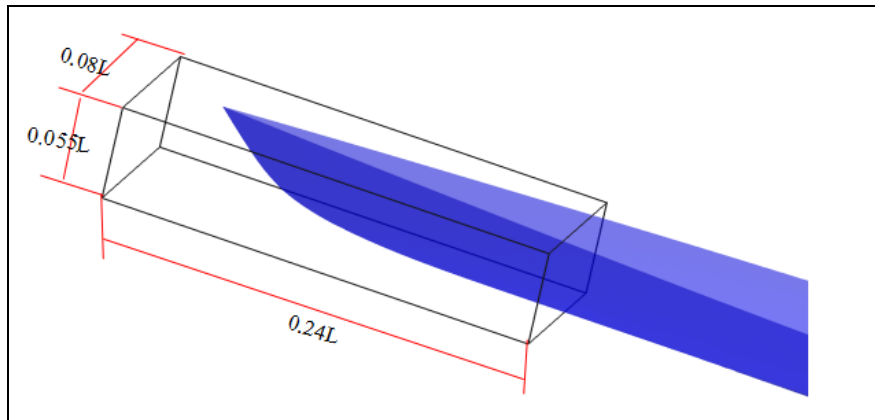


图 5 基于 FFD 方法的船型变化区域

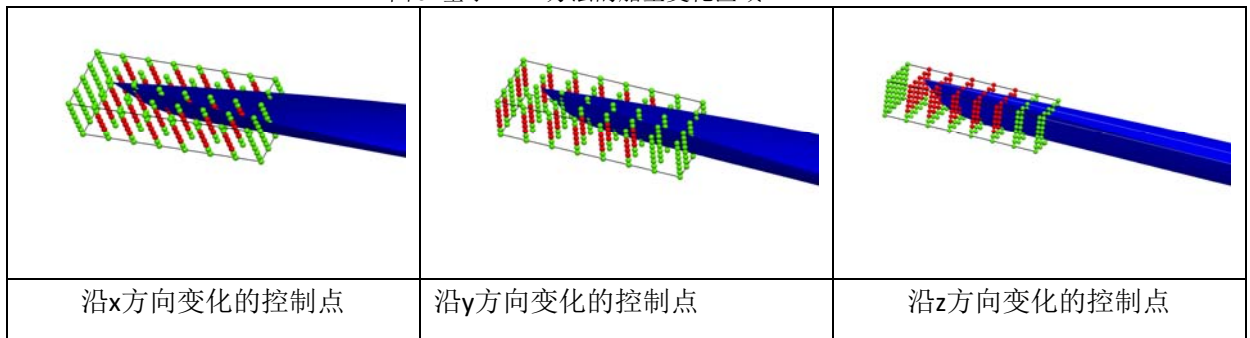


图6 FFD方法中可动控制点的分布

另外一些约束条件施加在设计变量上, 包括排水量, 湿表面积, 主尺度等, 具体优化信息见下表 2

表 2 优化问题的定义

类型	定义	注释
母型船	Delft 372 双体船	
目标函数	$f_{obj}^1 = Cw, Fr = 0.5$ $f_{obj}^2 = Cw, Fr = 0.7$	裸船, 目的是考虑片体间距, 减小两个航速下的兴波阻力系数
设计变量		变量范围为无因次化量。
Δx_1 (变量 1)	[-0.05, 0.05]	局部优化区域控制点沿 x 芳香的变化量
Δy_1 (变量 2)	[-0.008, 0.008]	局部优化区域控制点沿 x 芳香的变化量
Δz_1 (变量 3)	[-0.003, 0.003]	局部优化区域控制点沿 x 芳香的变化量
ΔH (变量 4)	[-0.03, 0.03]	两片体间距变化量
几何约束		
主尺度	Lpp, D, B 固定	
排水量(∇)	最大变化量 $\pm 1\%$	
湿表面积(Swet)	最大变化量 $\pm 1\%$	
试验设计	优化拉丁方	产生 40 个样本点
近似模型	Kriging 模型	
优化方法	NSGA-II	
种群大小	500	
最大迭代次数	300	

4.3 结果

试验设计是通过人为控制的试验来研究事物探索其发展规律的一种方法, 优秀的试验设计能有效降低试验次数, 缓解仿真计算的压力。试验设计是数理统计学的应用方法之一, 它的主要内容是讨论如何合理地安排试验、取得数据, 然后进行综合的科学分析, 从而达到尽快获得最优方案的目的。本文采用优化拉丁方生成样本点, 并采用 Kriging 方法建立近似模型, 至此, 可凭该模型直接获取任一组设计变量对应的目标函数值, 在误差允许范围内, 大大降低了计算成本。最后采用了 NSGA-II 优化算法得出 Pareto 解集如图 7, 其中红色点为本文所选优化后一个船型。

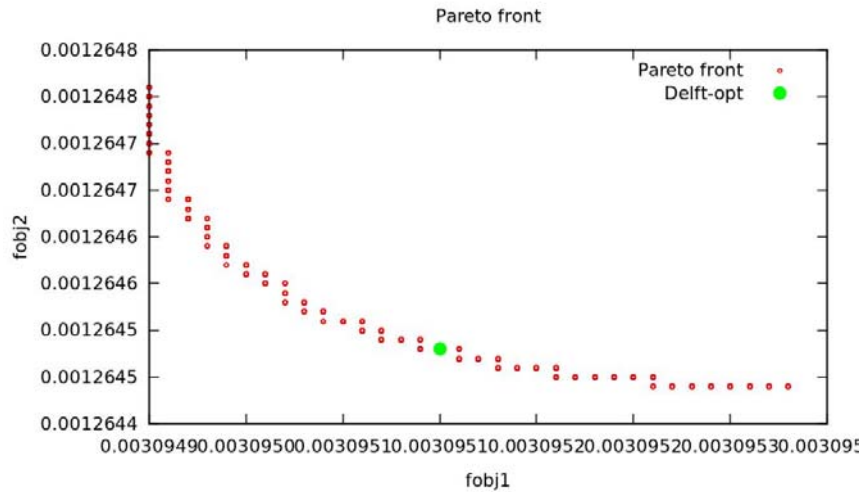


图7 优化问题的 Pareto 解集以及所选优化方案之一

变形控制区域虽然较大，但是对于控制点的变化范围其实很小，却产生了很多不同的船型，从下图8船舶前半体横剖线图可以看出，所选择的优化船型较母型船，首部明显偏瘦，减少了兴波干扰。同时，片体间距较原来大了0.0166L，达到0.133L距离。因此，在双体船甚至多体船设计时，片体间距的大小可据此来进行合理的选择。

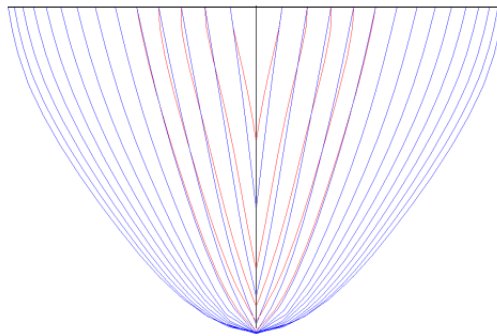


图8 优化前后单个片体前半体横剖线变化情况

表3 优化后的船与母型船的兴波阻力系数对比

		Fr=0.5	Fr=0.7
C_w	Initial Hull	3.48E-03	1.25E-03
	Delft-opt	3.17E-03	1.17E-03
Reduction		8.91%	6.40%

表3是优化船与母型船的兴波阻力系数对比结果，在Fr=0.5时，阻力系数下降8.91%较之Fr=0.7时，阻力系数下降6.4%稍大。据实验数据，在Fr=0.5时，片体间兴波不利干扰较大。该航速下的兴波阻力系数在优化后降幅更大是可能的。因此，在双体船设计时，应尽量避免不利干扰。

5 结论

本文采用自主开发的OPTShip-SJTU软件，基于Neumann-Michell理论和多目标遗传算法(NSGA-II)进行船型优化，以双体船Delft 372为例，利用FFD方法修改船体曲面，并

将双体船片体间距作为设计变量之一, 将兴波阻力作为目标函数, 同时对两个航速 ($Fr=0.5, 0.7$) 下的 Delft 372 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集合。OPTShip-SJTU 软件的优化思想可以用来指导船型初步设计。

6 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] Yang, C., et al. (2014) Hydrodynamic optimization of a triswath. *Journal of Hydrodynamics* **26**(6): 856-864.
- [2] Tahara, Y., et al. (2011) Single- and multi-objective design optimization of a fast multihull ship: numerical and experimental results. *Journal of Marine Science and Technology* **16**(4): 412-433.
- [3] Zhang, B.-J. and Z.-X. Zhang (2015) 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* **7**(5): 785-794.
- [4] Zhang, B.-j., et al. (2015) Research on design method of the full form ship with minimum thrust deduction factor. *China Ocean Engineering* **29**(2): 301-310.
- [5] Sederberg, T. W. and S. R. Parry (1986) Free-form deformation of solid geometric models. *SIGGRAPH Comput. Graph.* **20**(4): 151-160.
- [6] Coquillart, S. (1990) Extended free-form deformation: a sculpturing tool for 3D geometric modeling." *SIGGRAPH Comput. Graph.* **24**(4): 187-196.
- [7] 赵连恩, 谢永和. (2009). 高性能船舶原理与设计(精). 国防工业出版社.p:64-69.
- [8] Noblesse, F., et al. (2012) The Neumann-Michell theory of ship waves. *Journal of Engineering Mathematics* **79**(1): 51-71.
- [9] Noblesse F, Huang FX, Yang C. (2013) The Neumann-Michell Theory of Ship Waves. *Journal of Engineering Mathematics* **79**(1): 51-71.
- [10] Chengliang Zhang, Jiayi He, Chao Ma, et al. (2015) Validation of the Neumann-Michell Theory for Two Catamarans. *Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- [11] 邓芳, 邓魏彬. (2015) 双体船阻力性能计算及船型设计优化. *青岛科技大学学报: 自然科学版*, **36**(1): 72-76.