



申请上海交通大学博士学位论文

基于粘流理论的船型优化软件开发与应用研究

学 校： 上海交通大学

院 系： 船舶海洋与建筑工程学院

班 级： A1501092

学 号： 015010910031

专 业： 船舶与海洋工程

博 士 生： 缪爱琴

导 师： Francis Lucien Noblesse 教授

万德成 教授

上海交通大学

船舶海洋与建筑工程学院

2020 年 11 月



15008826



**A Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University for the
Degree of Philosophy Doctor**

**DEVELOPMENT OF COMPUTER CODE FOR SHIP
DESIGN OPTIMIZATION BASED ON VISCOUS FLOW
THEORY AND ITS APPLICATIONS**

Author: Aiqin Miao

Advisor: Prof. Francis Lucien Noblesse

Prof. Decheng Wan

Specialty: Naval Architecture and Ocean Engineering

School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering

Shanghai Jiao Tong University

Shanghai, P.R. China

November, 2020



15008826



15008826



15008826



基于粘流理论的船型优化软件开发与应用研究

摘要

针对水动力性能优化的船型设计是一项复杂的庞大的实际工程应用课题。随机的海洋环境问题、诸多的水动力性能指标要求、迥异的船舶几何外形等都给船型优化设计带来了巨大的挑战。得益于计算机技术的不断发展,基于粘流理论的计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)在船舶海洋工程水动力学领域得到了普遍应用,成为船海工程水动力性能预报的一个重要手段。通过粘流 CFD 数值评估不仅可以得到船舶的全局水动力性能,诸如船舶阻力、船舶姿态、推进效率、耐波性、操纵性能等,而且可以获取到详细的局部流场信息,比如船首波高、伴流场、局部压力等,这给船型优化设计问题提供了一个能够综合评估船舶水动力性能指标的数值工具。因此,在粘流 CFD 的基础上研究和开发船型精细快速优化技术具有重要的意义。

本文以课题组自主开发的粘流 CFD 数值求解器 naoe-FOAM-SJTU (专门解决船舶与海洋工程的水动力问题)为基础,在课题组已有的基于势流理论自主开发的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 1.0 上进一步开发和拓展了功能模块,使得粘流 CFD 数值模拟应用于船型精细快速优化设计中,改进并升级到船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0。求解器具有良好的通用性,可以应用于水下潜器的构型优化问题、单体船的总阻力优化问题、高速双体船的总阻力多目标优化问题以及低速肥大船的总阻力和伴流场综合优化问题。

优化求解器的主要功能包括:船型变换功能、水动力性能评估功能、近似模型构建功能以及优化求解功能,因此求解器由与之对应的四大模块构成。在基于粘流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0 中,主要有以下改进和升级:在船型变换模块中,进一步开发和完善了基于船体 NURBS 的半参数化船型变形功能,加入了 FFD 方法和平移方法,与原有的 RBF 方法共同形成了灵活多样的船型变换功能,实现了船型全局或局部几何精细变形,并可直接得到供工业建造的三维模型;为了实现粘流 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 作为水动力性能评估工具,添加了基于映射法的船体曲面网格生成模块,实现了基于船体 NURBS 的船型几何重构后的船体曲面网格剖分功能,再结合 OpenFOAM 自带的体网格生成工具 snappyHexMesh,实现了数值模拟的流体域计算网格批量自动重生成功能;在近似模型构建模块中补充了 Sobol 采



样方法并修改了优化拉丁超立方采样方法,实现了给定样本点数的采样以及根据样本点实际需求的自适应采样功能;在优化算法模块中采用了单目标和多目标遗传算法,并进一步将遗传算法和近似模型结合,研究和开发了基于 Kriging 模型的高效全局优化算法(Efficient Global Optimization, EGO),包括单目标和多目标 EGO 算法,实现了船型优化设计问题全局解的快速准确求解。为了满足船型优化设计的自动化要求,求解器各功能均采用了面向对象设计的 C++语言编写,兼具模块化和一体化特点,并且针对实际问题求解器具有较强的可扩展性。

论文对 OPTShip-SJTU 2.0 进行了系列算例应用验证。首先对标准水面单体船的总阻力进行了单目标优化设计,采用了基于船体 NURBS 的几何变形以及映射法自动重生成网格,采用了 RANS 方法评估样本船型的总阻力值,并采用了 EGO 算法求得最优船型,指出了基于粘流 CFD 的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0 的优化求解过程并验证了该求解器的可行性和可靠性;接着是对水下潜艇的总阻力及伴流性能进行了优化,采用了 FFD 方法对艇型整体变形,并采用了 Sobol 方法采样,采用了带重叠网格技术的 DDES 方法求解流场,以及采用了 EGO 算法进行寻优,从而验证了该求解器对水下潜器形状优化的适用性;然后考虑片体间距对高速双体船的两个航速下的总阻力进行了多目标优化设计,采用了 Sobol 算法渐进采样新船型,使用了 FFD 方法对片体船首 NURBS 曲面进行大变形,并将片体间距作为变形参数之一,对所有样本船型采用 RANS 方法评估样本船型的总阻力值,以考虑片体之间复杂的流动干扰现象,验证了基于粘流 CFD 技术进行船型优化设计的巨大优势;最后对低速肥大型船的阻力和尾部伴流性能进行了综合优化,采用了 FFD 方法对船体首部和尾部 NURBS 曲面同时进行变形,应用 RANS 方法对样本船型进行水动力性能评估,最后采用了多目标 EGO 方法进行寻优,从而验证了 EGO 方法在基于粘流理论的船型优化设计过程中的有效性。

综上所述,论文将原有的船型优化设计求解器 OPTShip-SJTU 1.0 升级到了 OPTShip-SJTU 2.0,实现了基于粘流理论的船型精细快速优化设计,并将其成功应用到了水下潜器、单体船、高速双体船以及低速肥大型船的全局水动力特性以及局部流场细节综合优化上。该求解器可供船舶设计人员进行各类水面船舶以及水下结构物的实际构型设计,以优化其水动力性能,甚至可以拓展应用到风机、平台等一系列浮式海洋结构物的水动力性能优化设计中。

关键词: 船型优化, 粘流理论, OPTShip-SJTU 2.0 求解器, EGO, 船体 NURBS 半参数化变形



DEVELOPMENT OF COMPUTER CODE FOR SHIP DESIGN OPTIMIZATION BASED ON VISCOUS FLOW THEORY AND ITS APPLICATIONS

ABSTRACT

Ship design optimization for hydrodynamic performance is a complex and large practical engineering application issue. Random marine environmental problems, many hydrodynamic performance requirements and ships and marine structures with different configurations have brought huge challenges to ship design optimization. With the development of computer technology, Computational Fluid Dynamics (CFD) based on viscous flow theory has been widely applied in hydrodynamic problems of ships and marine structures, and has become a significant tool for predicting hydrodynamic performance. Through the viscous CFD numerical evaluation, global ship hydrodynamic performance such as the resistance, motion, propulsion efficiency, seakeeping and maneuverability, as well as detailed local flow field information such as bow wave height, wake performance and local flow pressure can be obtained, which indicates CFD can be a very good numerical tool for comprehensively evaluating the hydrodynamic performance of a ship in ship design optimization. Therefore, it is very important to study and develop a fine and fast ship design optimization technology based on viscous CFD numerical simulations.

Based on the viscous CFD simulation solver naoe-FOAM-SJTU, which is specially designed for ship and ocean engineering hydrodynamics problems, this thesis further develops and extends the functional modules of the existing ship design optimization solver OPTShip-SJTU 1.0 based on potential flow theory. As a result, viscous CFD technology has been applied to ship fine and fast design optimization and OPTShip-SJTU 1.0 has been upgraded to the solver OPTShip-SJTU 2.0. The solver has good versatility, which is applied to the optimization problem of the total resistance of a mono ship, the multi-objective optimization problem of the total resistance of the high-speed catamaran, the comprehensive optimization problem of the total resistance and stern wake performance of the low-speed full ship and the configuration optimization problem of an underwater submarine, etc.



The solver consists of four main functional modules: ship hull modification module, hydrodynamic performance evaluation module, approximate model construction module and optimization solution module. For the solver OPTShip-SJTU 2.0 based on viscous flow theory, the main changes are as follows: In the ship hull modification module, the NURBS-based ship hull semi-parametric deformation module is further developed and improved. The FFD method and the shifting method are added. Combined with the existing RBF method, a flexible and diverse ship hull modification function is formed, which can realize a ship hull's global or local fine deformation and can directly obtain the 3D model for industrial building. In order to realize the viscous CFD solver naoe-FOAM-SJTU as the hydrodynamic performance evaluation tool, the hull surface mesh generation module based on the mapping method is added to realize the rapid and automatic regeneration of any new ship hull surface mesh. Combined with OpenFOAM's own volume mesh generation tool snappyHexMesh, the computational grid of the fluid domain for CFD numerical simulations is automatically regenerated. The hydrodynamic performance evaluation module directly calls the CFD solver naoe-FOAM-SJTU for numerical simulations. Sobol sampling method is added and existing Latin hypercube sampling (LHS) method is modified in the approximate model construction module to realize flexible sampling according to the actual demand for the number of sample ships. Optimization solution module uses a single objective and multi-objective genetic algorithms and further develops a Kriging-based global optimization algorithm (Efficient Global Optimization, EGO), to quickly and accurately achieve the global solution for a ship design optimization problem. In order to meet the automation requirement of ship design optimization, each module of the solver is written in C++ language of object-oriented design, which makes the solver with modularity and integration features, and has a strong extendibility for solving practical problems.

The thesis has conducted a series of application verification for OPTShip-SJTU 2.0. Firstly, the single-objective optimization design of the total resistance for a standard mono ship is carried out. NURBS-based ship hull semi-parametric deformation is adopted to modify the ship and any sample ship hull's mesh is automatically regenerated based on the mapping method. The resistance of sample ships is calculated by RANS method. The optimized ship is finally obtained by the EGO method. The whole optimization design process by the viscous flow theory-based solver OPTShip-SJTU 2.0 is shown and its feasibility and reliability are validated. Next, the total resistance and wake performance at stern of the submarine are optimized. The FFD method is used to deform the overall shape of the hull, and the Sobol method is selected for progressive sampling. The DES method with overset grid technique is applied to solve the flow field, which indicates that the solver is also suitable for the shape optimization of the underwater submarines. Then, the total



resistance at two speeds for the catamaran considering the demihulls' separation is optimized by the multi-objective algorithm. Sobol method is adaptively used to select sample ships. The FFD method is applied to deform the demihulls' bow surface. The separation between demihulls is considered as one of the deformation parameters and the RANS method is adopted to evaluate the resistance of sample ships, in order to consider the complex flow interference between the demihulls. This case has proved the huge advantage of viscous CFD-based ship design optimization. Finally, the total resistance and wake performance at the disk of the low-speed full ship are comprehensively optimized. The FFD method is used to simultaneously deform the hull bow and stern. The hydrodynamic performance is evaluated by the RANS method. EGO is applied to find the optimal solution. It turns out the EGO method is effective in ship design optimization process based on the viscous flow theory.

In summary, the thesis upgrades the existing ship design optimization solver OPTShip-SJTU 1.0 to OPTShip-SJTU 2.0, which realizes the automatic ship design optimization based on the viscous flow theory. It is successfully applied to the comprehensive optimization problems for both global hydrodynamic characteristics and local flow field details of the mono ship, the high-speed catamaran, the low-speed fat ship and the underwater submarine. The solver can be used by ship designers to design the actual configuration of various surface ships and underwater marine structures for the optimization of their hydrodynamic performance. And it even can be extended to the hydrodynamics optimization of a series of floating marine structures such as wind turbines and platforms.

Keywords: ship design optimization, viscous flow theory, OPTShip-SJTU 2.0 solver, EGO, NURBS-based semi-parametric deformation



15008826



符 号 表

符号	定义	单位
$f(\mathbf{x})$	目标函数	--
$\mathbf{x}$	设计变量	--
D	可行域	--
S_W	湿表面积	m^2
∇	排水量	m^3
L_{pp}	垂线间长	m
T	吃水	m
R_T 或 R_t	总阻力	N
R_F 或 R_f	摩擦阻力	N
R_W 或 R_w	兴波阻力	N
R_P 或 R_p	压阻力	N
R_V	粘性阻力	N
IF	干扰因子	--
U	航速/来流速度	m/s
α_1	平移法中船体变形的最大幅度	--
α_2	平移法中船体曲面变形范围内固定不变的纵向位置	--
s, t, u	FFD 方法中的局部坐标系	--
$\mathbf{X}_0$	FFD 方法中的局部坐标系的原点	--
$\mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{U}$	FFD 方法中的局部坐标系下沿三个坐标轴的轴矢量	--
$\mathbf{P}_{i,j,k}, \mathbf{P}'_{i,j,k}$	FFD 方法中的控制点坐标	--
l, m, n	FFD 方法中的控制框沿三个坐标轴的控制点数	--
$\mathbf{B}$	FFD 方法中的伯恩斯坦多项式	--
$\mathbf{X}(s, t, u), \mathbf{X}_{ffd}$	FFD 方法中物体变形前后的控制点位置	--



符 号 表

ϕ	RBF 基函数	--
$s(\mathbf{X})$	RBF 方法中的位移函数	--
N	RBF 方法中的控制点个数	--
$\mathbf{X}_j$	RBF 方法中的基函数中心	--
f_j	RBF 方法中边界控制点的位移量	--
$p(\mathbf{X})$	RBF 方法中的仿射变换的低阶多项式	--
ρ_{ij}	矩阵列相关系数	--
$\rho_{\max}$	矩阵最大列相关系数	--
$d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$	两个样本点的距离值	--
ϕ_p	OLHS 方法中的最小距离准则	--
$\Phi_{b,C}(i)$	Sobol 算法中的 radical inversion 运算值	--
C	Sobol 算法中的生成矩阵	--
μ	Kriging 方法中的随机过程的均值	--
$\varepsilon(\mathbf{x}^{(i)})$	Kriging 方法中对局部误差的近似	--
$\mathbf{R}$	Kriging 方法中的相关矩阵	--
θ_h, p_h	Kriging 方法中的未知参数	--



缩 略 词 表

缩略词	全称或注释
EEDI	Energy Efficiency Design Index（能效设计指数）
CFD	Computational Fluid Dynamics（计算流体力学）
EFD	Experimental Fluid Dynamics（实验流体力学）
SBD	Simulation-Based Design（基于仿真的设计）
RBF	Radial Basis Function（径向基函数）
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines（非均匀有理 B 样条）
FFD	Free-Form Deformation（自由变形）
NM	Neumann-Michell（纽曼-密歇儿）
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes equation（雷诺平均 N-S 方程）
URANS	Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes equation（非稳态雷诺平均 N-S 方程）
DES	Detached Eddy Simulation（分离涡模拟）
DDES	Delayed Detached Eddy Simulation（延迟分离涡模拟）
LES	Large Eddy Simulation（大涡模拟）
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm（非支配排序遗传算法）
EI	Expected Improvement（期望改善）
EIM	Expected Improvement Matrix（期望改善矩阵）
EGO	Efficient Global Optimization（高效全局优化）
GA	Genetic Algorithm（遗传算法）
DOE	Design of Experiment（试验设计）
LHS	Latin Hypercube Sampling（拉丁超立方采样方法）
OLHS	Optimal Latin Hypercube Sampling（优化拉丁超立方采样方法）
RSM	Response Surface Model（响应面模型）
IGES	the Initial Graphics Exchange Specification（初始化图形交换规范）



15008826



目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT	III
符 号 表.....	VII
缩 略 词 表.....	IX
第一章 绪 论.....	1
1.1 课题研究的背景和意义	1
1.2 船型优化设计的国内外研究进展	3
1.2.1 船型表达及变换技术的研究进展	4
1.2.2 水动力性能评估技术的研究进展	8
1.2.3 最优化技术的研究进展	13
1.2.4 近似技术的研究进展	16
1.2.5 研究进展的综述	18
1.3 船型优化设计的软件开发	19
1.3.1 国外的软件开发	19
1.3.2 国内的软件开发	21
1.3.3 本文的软件开发	22
1.4 本文的主要研究工作和创新点	23
1.4.1 本文的主要研究工作	23
1.4.2 本文的创新点	24
第二章 船体 NURBS 曲面的半参数化变形方法研究.....	27
2.1 船体的几何表达及变形方法概述	27
2.2 船体 NURBS 曲面表达方法	30
2.3 船体 NURBS 曲面的半参数化变形方法	36
2.3.1 平移法对船体 NURBS 曲面变形	36
2.3.2 FFD 方法对船体 NURBS 曲面变形	38



2.3.3 RBF 方法对船体 NURBS 曲面变形	42
2.4 船体 NURBS 曲面网格快速生成方法	45
2.4.1 网格生成方法	45
2.4.2 网格文件格式	47
2.5 本章小结	49
第三章 船舶目标性能近似模型构建及优化求解方法研究	51
3.1 船型优化设计中的数值计算量巨大问题	51
3.2 船舶目标性能近似模型构建方法	52
3.2.1 采样方法	52
3.2.2 Kriging 近似模型	57
3.2.3 应用与验证	61
3.3 船舶目标性能的优化求解方法	65
3.3.1 遗传算法	65
3.3.2 基于近似模型的高效全局优化算法	74
3.4 本章小结	83
第四章 求解器 OPTSHIP-SJTU 2.0	85
4.1 求解器 OPTShip-SJTU 2.0 模块说明	85
4.2 求解器 OPTShip-SJTU 2.0 流程图	88
4.3 求解器 OPTShip-SJTU 2.0 结构图	90
4.4 求解器 OPTShip-SJTU 2.0 标模验证	91
4.4.1 优化对象基本信息	91
4.4.2 母型船的阻力数值计算可靠性验证	92
4.4.3 优化设计及结果分析	95
4.5 本章小结	100
第五章 潜艇的阻力和伴流性能优化实例	101
5.1 引言	101
5.2 母型艇阻力及伴流性能数值计算	101
5.2.1 优化对象基本信息	101
5.2.2 母型艇不同航速的阻力数值计算	102
5.3 优化设计及结果分析	104
5.3.1 优化问题定义	104
5.3.2 优化结果及分析	106



5.4 优化艇和母型艇自航推进对比验证	110
5.5 本章小结	114
第六章 高速双体船的多航速阻力性能多目标优化	117
6.1 引言	117
6.2 S60 双体船的多航速总阻力数值计算	117
6.2.1 母型船的基本信息	117
6.2.2 母型船的阻力数值计算可靠性验证	118
6.3 S60 双体船的优化设计及结果分析	122
6.3.1 优化问题定义	122
6.3.2 近似模型精度评估	124
6.3.3 灵敏度分析	124
6.3.4 优化算法参数设置	125
6.3.5 优化船和母型船对比分析	125
6.4 本章小结	136
第七章 低速肥大型船的总阻力及伴流综合性能优化	139
7.1 引言	139
7.2 母型船的阻力和伴流性能数值计算	139
7.2.1 母型船的基本信息	139
7.2.2 母型船的阻力和流场数值计算可靠性验证	140
7.3 优化设计及结果分析	145
7.3.1 优化问题定义	145
7.3.2 灵敏度分析	147
7.3.3 优化算法设置	149
7.3.4 优化船与母型船对比分析	149
7.4 本章小结	156
第八章 总结与展望	157
8.1 论文总结	157
8.2 研究展望	159
参 考 文 献	161
攻读博士学位期间已发表或录用的论文	169
攻读博士学位期间参与的科研项目	171
致 谢	173



15008826

目 录



第一章 绪 论

1.1 课题研究的背景和意义

2011 年国际海事组织 IMO 引入能效设计指数（Energy Efficiency Design Index, EEDI），强制船舶设计单位、造船厂等在船舶设计阶段必须同时考虑提高船舶的运输量和降低 CO₂ 排放；2015 年 EEDI 正式生效，对于不满足要求的船型则必须重新优化设计建造，方可进入国际市场。由此可见，EEDI 的提出对船型优化设计在节能减排方面提出了更严格的要求。

近年来国内外船舶环保新标准不断出台：自 2015 年 1 月 1 日起，波罗的海、北海及加勒比海硫排放控制区内船用燃料硫含量不超过 0.1%，以此控制硫含量的排放；2016 年 10 月，IMO 通过了一项新决议：自 2020 年 1 月 1 日起，将船用燃料的硫含量上限从当前的 3.5%大幅降至 0.5%；2019 年 1 月 1 日，我国发布的《船舶大气污染物排放控制区实施方案》生效，这方案里面就明确规定了我国指定海域内硫氧化物、颗粒物排放、氮氧化物排放等控制要求。因此，船型优化设计必须朝着绿色船舶方向持续发展。

此外，在当前高油价时代，船东极其关注船舶的油耗指标，加上船市长期呈低迷态势，造船企业和设计院所想要获得订单，必须推出低油耗船型。为争抢订单，国内外船企必须抓紧时间进行研究和准备，从船型设计着手，综合使用各种办法，不仅要在技术上满足标准要求，还要尽量控制造船成本。2010 年，中国船舶七〇二所专门成立了“绿色船舶技术攻关小组”，主要围绕降低船舶 EEDI 指数开展了船型优化技术、高效推进增效技术、水动力节能技术、气泡减阻技术、风帆助推技术等绿色节能船舶技术攻关和工程应用技术研究；2015 年 5 月，由荷兰 Damen 造船集团主导的欧洲 13 个国家 46 家船东、造船企业、配件企业以及研究机构展开合作了一项欧洲创新项目——LeanShips（Less Energy And Near to zero emissions Ship），拟将欧洲船舶改造为低能耗、零排放的绿色节能船舶，具体指标为船舶燃耗量降低最大 25%、二氧化碳排放量降低最小 25%以上、硫氧化物及氮氧化物及细微粉尘排放量降低最大 100%。



20 世纪 60 年代末, 得益于计算机技术的发展, 计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 技术得以发展和应用。CFD 技术是基于粘流理论发展起来的数值方法。目前 CFD 技术展现出了巨大优势: 它不仅能够进行模型尺度下的计算, 还可以进行实尺度的数值模拟, 进而避免尺度效应问题; 不仅可以进行静水问题的模拟, 还可以进行波浪问题的模拟, 进而可以模拟实际海洋环境工况下的船舶航行; 不仅可以得到全局的流场结果, 诸如阻力值、船舶六自由度运动等, 还可以得到局部的流场细节, 诸如桨盘面伴流场、首部砰击压力等; 此外, CFD 技术的另外一大优势在于它的计算时间相对短和计算成本相对低: 相较于耗费数周的时间且动辄数十万元的物理水池试验, 一个船体阻力 CFD 算例在个人电脑上花上几个小时或在超算上几十分钟就可以完成, 且与水池试验对比结果来看目前成熟的 CFD 软件能够提供可靠的阻力预报精度, 足以满足实际工程需求。因此, CFD 技术在船型优化设计领域拥有巨大的应用前景。

基于 CFD 技术的船型优化设计又称为基于仿真的设计 (Simulation-Based Design, SBD)。该设计方法有序集成了船型表达与变换技术 (或称船型几何表达与重构技术)、基于 CFD 技术的水动力性能预报及评估技术、最优化理论技术、计算机并行处理技术、近似模型 (又称代理模型) 构建技术。它是传统的船型优化设计的逆问题, 是一种有科学依据的、智能化的、精细的船舶线型优化设计方法。但目前基于粘流 CFD 技术的船型优化设计仍然面临不少挑战: 1) 船舶综合水动力性能的优化需求越来越大, 船型优化设计的目标性能不再仅仅是船舶的全局水动力性能, 而是更加关注综合的水动力性能, 即有时需要兼顾一些局部的流场性能, 如需要同时考虑总阻力和局部的伴流性能; 2) 优化某些特定的船型或者针对特定的目标性能时优化难度较大, 比如低速肥大型船舶的阻力优化必须考虑粘性影响、双体船或者多体船必须考虑片体间干扰影响等; 3) 船舶 CAD/CAE 一体化的系统发展趋势一方面对船型几何曲面表达及变形提出了更高要求, 必须实现三维数据统一, 以便于工业设计与制造, 另一方面对船型表达及变换模块与 CFD 数值仿真分析模块之间的数据耦合提出了更高要求, 必须实现数据信息的自由实时流通; 4) 船型优化设计中的 CFD 计算量越来越大, 尤其面对多个目标性能优化需求, 计算量成倍增加, 而工程要求的优化精度以及优化效率又越来越高, 这都给基于 CFD 技术的船型优化设计带来了更大的挑战。

因此, 本文将瞄准船型优化设计技术的发展前沿, 针对绿色化、智能化船型设计的新思路和高要求, 开展船型优化设计的关键技术研究和开发, 实现基于粘流理论的船型自动优化设计, 最终拥有自主软件开发能力和工程实用能力。



1.2 船型优化设计的国内外研究进展

随着计算机技术和 CFD 技术的迅猛发展,船舶线型优化设计得到专家学者的重视,从单纯地依赖设计者经验的传统方法转向基于数值预报性能驱动船舶设计的科学方法。从 1999 年起 Tahara (1999a, 1999b, 2000) 连续发表了三篇关于船型优化的文章,从此船型优化研究拉开崭新的序幕。

船型优化设计问题用数学的语言表达如下:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in D \\ & \text{subject to} && g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & && h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (1-1)$$

其中, $f(\mathbf{x})$ 是船型优化的目标函数,即水动力性能指标,比如阻力值、伴流分数值、运动响应等。 $\mathbf{x}$ 是其设计变量,代表船型变换参数, D 为该优化的可行域,即设计空间、可变形范围,可行域上的任一点代表一组设计变量 $\mathbf{x}$,且映射一个目标函数值。 $g_i(\mathbf{x})$ 与 $h_j(\mathbf{x})$ 是优化的不等式约束函数以及等式约束函数,比如对船型主尺度、湿表面积、排水体积甚至螺旋桨轴高度进行精准的形状约束等。

因此,船型优化设计问题求解(如图 1-1)的基本思路是以水动力性能为目标函数,采用特定的船型变换技术修改全局或者局部的船体型线,并以一些关键的船型修改参数为设计变量,在一定的几何形状约束下,通过科学的优化算法得到性能最优的船型。它主要包含三大关键技术:船型表达及变换技术、水动力性能评估技术以及优化算法技术。除此之外,为了降低数值计算资源成本和时间成本,引入近似技术到船型优化流程中。近似技术是通过试验设计方法在船型设计空间里科学地选择一系列样本船型,然后通过 CFD 方法直接计算样本船型的水动力性能指标,最后通过数学方法近似表达船型修改参数和水动力性能的代数关系,建立近似模型。这样在优化迭代过程中,产生的每一个新船型都可以通过近似模型直接评估其水动力性能指标。近似技术大大减轻了海量数值计算负担,同时加快了船型优化响应时长,因此极大地推进了 CFD 技术在船型优化领域的应用。

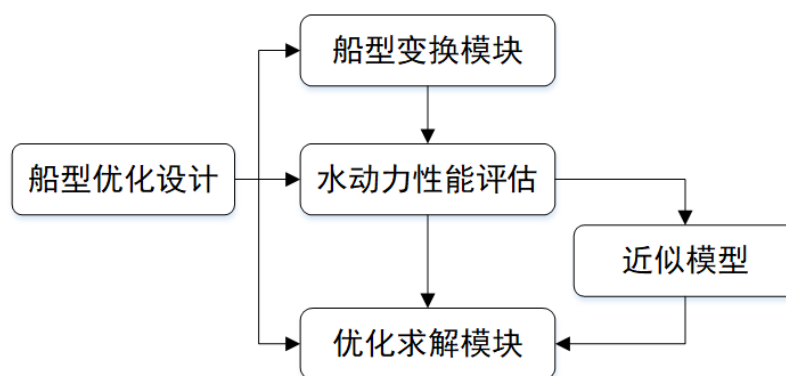


图1-1 船型优化方法基本框架

Fig.1-1 The basic framework of ship design optimization method

本世纪初，欧盟于 2005 年起实施了为期四年的虚拟试验水池 VIRTUR（The Virtual Tank Utility in Europe）计划，该计划就是集成先进的 CFD 数值分析工具，构建“虚拟水池”，为船舶性能设计与构型创新提供技术支持，最终解决多目标的船舶水动力性能复杂的优化问题，但该项目实际上还只是多方案的优选策略，并非本文所述的优化设计。

近年来一些专注船舶水动力学性能前沿的著名国际会议诸如 ONR、ITTC 以及 ISOPE 等都有将船型优化设计相关的主题作为会议的一个专题探讨。可见，船型优化设计已受到巨大的关注。

下面将从船型优化设计的关键技术出发详细阐述国内外学者在船型优化设计领域的重要研究发展。

1.2.1 船型表达及变换技术的研究进展

船型表达及变换是船型优化设计中至关重要的环节之一，也是船型优化设计的第一环节。船型表达技术的关键在于能够有效、准确且直接的表达船体形状，船型表达方式的选择也影响船型变换技术的选择；船型变换技术主要关注采用何种变形方法能够有效获得光顺且实际的船型，采用何种变形方法能够获得较大的变形空间，采用何种变形方法能够使得变形控制参数较少等问题，这些是船型变换技术的目标，也是难点所在。船型变换技术的选择和变形参数的确定决定了船型优化设计问题的有效设计空间。

船型表达方法主要有型值表达、三角形或者四边形网格表达、船型参数表达以及 NURBS 曲面表达等方式。型值表达方式 (Peri, D., et al., 2001; Zhang, B. J. et al., 2009;



李胜忠, 等, 2013; Kandasamy, M. et al., 2014; Zhang, B. J. et al., 2018) 是通过型值点表达船体曲面, 根据型值点可直接绘制船舶横剖面、纵剖面和水线面, 再通过放样可得到船体曲面形状, 可见这种表达方式需要重新建模、优化光顺得到船体曲面, 在早期的船型优化设计中经常使用; 三角形或者四边形网格表达方式是离散网格单元表达船体曲面 (Peri, D., Campana, E. F., 2003; 李胜忠, 赵峰, 2011; 李胜忠, 2012; 李胜忠, 蒋昌师, 2013), 这种表达方式非常直观, 一般可以直接用于数值仿真, 但当进行大变形时可能破坏船体网格质量, 影响数值仿真结果, 从而影响优化结果; 船型参数表达方式将整个船体曲面抽象为一系列的特征参数、特征线, 比如: 长宽比、棱形系数、横剖面面积曲线、设计水线、平边线、甲板线等, 非常直接反映了船体几何特征, 但需要重新建模; NURBS 曲面表达方式 (又称 CAD 方法) 是通过一片或者多片 NURBS 曲面构成船体三维曲面, 曲面光顺, 无需重新建模, 可直接用于工业制造, 这种船型表达方式的使用使得 CAD 与 CAE 融合一体服务于船型设计, 是数字化船型优化设计的必然趋势。日本的 Tahara 教授等 (2003) 提出了发展 CAD/CFD 一体化的船型优化系统; Tahara 教授等 (2008) 基于 DTMB 5415 的船体 NURBS 曲面进行了优化设计并得到了优化船型的 NURBS 曲面; 美国杨驰教授团队在这方面做了系列研究工作 (Kim, H., et al., 2008; Kim, H., et al., 2009; Kim, H., Yang, C., 2013; Huang, F. X., et al., 2014; Wang, L. J., 2015), 包括船体 NURBS 曲面表达、加密以及曲面网格自动重生成技术等; 国内的冯佰威博士 (2011) 在其博士论文中详细介绍了 NURBS 曲面表达方式; 马丹萍等 (2016) 采用 NURBS 曲线表达翼型桨叶几何。

当前船型优化设计中所用到的船型变换方法主要有: Lackenby 方法、叠加融合方法、基于 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) 曲面直接变形法、平移法 (Shifting Method)、自由变形方法 (Free-Form Deformation, FFD)、径向基函数方法 (Radial Basis Function, RBF)、正交基函数方法 (Orthogonal Basis Functions) 等。

早在 1950 年, Lackenby (1950) 提出了基于棱形系数的变形, 即 1-C_p 方法或者 “Lackenby” 方法, 该方法采用二次多项式作为变换函数来变换母型船的横剖面曲线, 其涉及设计变量少, 但是设计空间较小, 只能得到与母型船相似的船型, 并且无法实现船体曲面的局部变形, 因此近些年应用较少 (Veldhuis, 2016)。

叠加融合变形方法是通过对已有的两条及更多条初始船型进行线型叠加, 通过改变加权系数来实现船型变换, 由于设计变量少, 易于实现, 得到广泛应用 (Tahara, T., et al., 2006; Kandasamy, M., et al., 2009; Feng, B.W., et al., 2009; 冯佰威, 等, 2009; 冯佰威, 2011; 詹成胜, 等, 2012; Kandasamy, M., et al., 2014)。Tahara 等



(2006) 采用叠加融合方法对油船尾部型线进行了变形；Kandasamy 等 (2009) 对某高速翼辅助半潜行双体船采用三条母型船叠加融合变形进行了船型变换；冯佰威 (2011) 博士论文中采用叠加融合方法实现了船型几何变换。该方法进行船型变换一般需要预先人工修改母型船以获取初始船型库，并且初始船型应尽量形状迥异，以保证叠加融合变形的船型的形状多样性，所以设计空间非常受限，并且同样无法达到船体曲面局部变形的精细控制。

法国工程师 Bezier 提出了贝塞尔 (Bezier) 曲线及曲面设计汽车几何外形。在船型变换中，该方法是在初始船型上叠加一片或者多片 Bezier 曲面，通过调整曲面的节点位置改变船型，因此移动节点位置可以获得不同的船型，并将节点位置直接作为设计变量。由于设计变量较少并且设计空间大，因此广泛应用于船体局部几何变形 (Peri, D. et al., 2001; Peri, D., Campana, E. F., 2003; Valorani, M. et al., 2003; 李胜忠, 赵峰, 2011; 李胜忠, 2012; Kandasamy, M., et al., 2014)。Peri 等 (2003) 采用 Bezier 曲面叠加方法对油船首部进行了变形优化；Peri 和 Campana (2003) 采用该方法对 DTMB 5415 进行了声呐罩变形；李胜忠和赵峰 (2011) 对 KCS 首部进行了变形；李胜忠 (2012) 采用 Bezier 曲面叠加的方法对 DTMB 5415 船型的声呐罩以及某散货船首部局部进行了船型变换。该方法适合新概念船型开发，得到的新船型有时较复杂，加大了工业制造的难度和周期，如图 1-2 为 Peri 等 (2001) 采用 Bezier 曲面叠加方法对某油船的船首进行变形优化得到的优化船型，从图中可以看出该优化船型的球首曲面呈波浪形，这样的曲面较为复杂，生产制造效率将大幅降低。

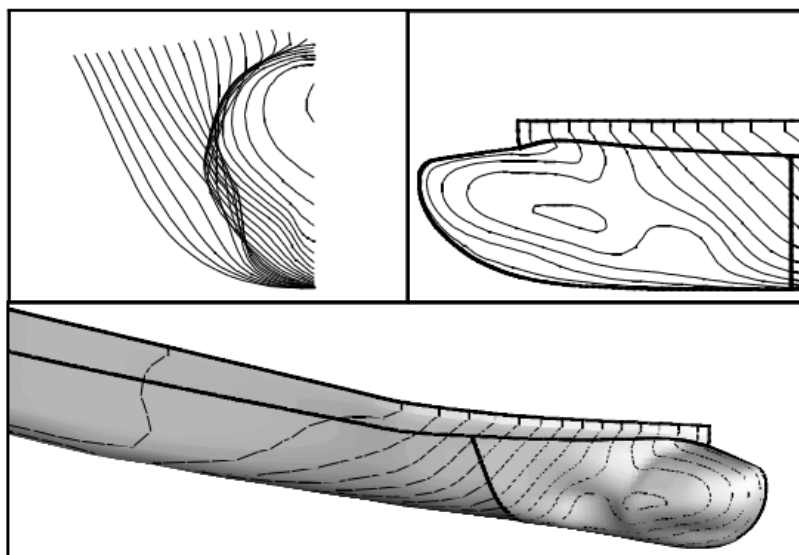


图 1-2 Bezier 变形所得优化船型 (Peri, D. et al., 2001)

Fig.1-2 The optimized hull by Bezier patch method (Peri, D. et al., 2001)



平移法是在 Lackenby 方法的基础上提出,是一种半参数化建模方法,通过改变横剖面的纵向位置来修改纵向棱形系数、浮心纵向位置以及平行中体长度。该方法可以用较少的船体特征参数对全船或者半船进行变形,从而减少了优化问题所涉及的设计变量个数。缺点是不能完全灵活地精细地修改船型,只是整体上改变了船体纵向排水量分布。杨驰教授团队采用该方法对 S60、某巡逻护卫舰、DTMB 5415 等进行了船型变换 (Kim, H., et al., 2009; Kim, H., Yang, C., 2013; Jeong, S., Kim, H., 2013; Huang, F. X., Yang, C., 2016); 上海交通大学 CMHL 中心也对该方法进行了大量的研究与应用 (Wu, J. W., et al., 2015; 吴建威, 等, 2015; Liu, X. Y., et al., 2016; Wu, J. W., et al., 2017; 吴建威, 2017; 刘晓义, 2017; 漆小舟, 2019; 陈泰文, 2019)。

自由变形方法 (FFD) 是由 Sederberg 和 Parry 于 1986 年提出的一种编辑几何形状的手段。该方法用一个灵活的、可塑的平行六面体将船体预变形曲面包围,倘若给平行六面体施加外力使其发生形变,则船体也会随之发生形变。FFD 方法可以适用任何几何船型;适用于局部或全局变形,并且具有导数连续性;使用容易;涉及的设计变量可多可少,多时可高达几十个,而少时可以是几个,曲面变形非常灵活,并且对变形区域的大小和位置严格可控,因此近年来该方法广泛应用于船体几何变形 (Tahara, Y., et al., 2011; 李胜忠, 2012; 李胜忠, 等, 2013; He, W., et al., 2013; Wu, J. W., et al., 2015; Chen, X., et al., 2015; Diez, M., et al., 2015; 吴建威, 等, 2015; Diez, M., et al., 2016; Miao, A. Q., et al., 2016; Wu, J. W., et al., 2017; Miao, A. Q., Wan, D. C., 2017; Miao, A. Q., et al., 2017; 缪爱琴, 等, 2018; Demo, N., et al., 2018; Tezzele, M., et al., 2018; Miao, A. Q., et al., 2020)。Tahara 等 (2011) 对 DTMB 5415 船型进行了船型变换,涉及变形参数个数 50 个;李胜忠 (2012) 采用 FFD 方法对高速船 DTMB 5415 球首进行了船型变换以及对某低速肥大型船首尾部进行了船型变换;Kandasamy 等 (2013) 采用 FFD 方法对喷水推进 Delft 双体船进行了船型变换。

径向基函数方法 (Radial Basis Function, RBF) 是由 de Boer 等 2007 年提出的一种物体网格变形方法。Kim 等 (2012) 对 KCS 前半船进行了船型变换;Huang 等 (2012) 对某三体船的中心片体采用 RBF 方法进行了全船变形;Huang 等 (2014) 采用 RBF 方法对 Wigley、S60 以及 Model 5279 首部进行了变形;Yang 和 Huang (2016) 在其综述文章中对 S60 采用了三组不同的 RBF 控制点分布进行变形,包括局部和全局变形;上交大 CMHL 中心吴建威等 (2015) 采用 RBF 方法对 Wigley 进行了全局变形;漆小舟 (2018) 对 S60 采用 RBF 方法进行了局部变形。由于径向基函数本身的“局部映射”特性,更适用于对船型进行局部修改,且 RBF 方法针对局部曲面进行修改涉及的设计变量数量较少;另外,该方法可根据设计者具体要求实现



几何形状局部严格约束,如保持水面严格不变、螺旋桨位置严格不变、球鼻艏长度固定不变等。

正交基函数方法是通过在船体表面叠加一个或者更多正交基函数曲面,该方法类似于 Bezier 曲面叠加方法,只是叠加曲面形式不同而已。所用正交基函数越多,变形空间越大,但同时设计变量也越多。Mcallister 等(2015)采用了 2 个正交基函数对 DTMB 5415 进行了全船变形;Campana 等(2015)采用了 6 个正交基函数对 DTMB 5415 船体进行船型变换,采用 2 个正交基函数对其声呐罩进行了变形;Diez 等(2015)采用了 4 个正交基函数对 DTMB 5415 船体进行船型变换,采用 2 个正交基函数对其声呐罩进行了变形,并且采用了两组变量范围进行优化对比;Diez 等(2016)采用 9 个正交基函数对 DTMB 5415 进行了全船变形;Serani 等(2016)采用 27 个正交基函数对 DTMB 5415 进行了全船变形。

1.2.2 水动力性能评估技术的研究进展

水动力性能评估技术是为船型优化设计问题中目标函数(快速性、耐波性和操纵性指标等)提供评估工具,是船型优化设计问题建立的前提条件。水动力性能评估技术的可靠性、效率以及经济性是船型优化设计所关注的一大重点和难点。

传统的方法是采用经验公式、模型试验。Kim 等(2010)对 DTMB 5415 的总阻力和耐波性进行了综合优化,其中耐波性就是采用了 Bales 的耐波性经验公式进行估算的;Feng 等(2011)优化某集装箱船的总阻力时也采用了相同的方法;Vakilabadi 和 Motahari(2017)优化 DTMB 5115 的船舶总阻力时才用的是 Holtrop 法计算兴波阻力以及 ITTC 平板摩擦公式计算摩擦阻力。采用经验公式估算方法的精度很难把握,船型适用局限大;而众所周知,模型试验的费用高,周期长,因而都难以应用于船舶水动力性能自动优化问题上,但它一般被用来验证数值模拟以及优化结果的可靠性(Peri, D., et al., 2001; Peri, D., Campana, E. F., 2003; Tahara, Y., et al., 2011; 李胜忠, 2012; Kandasamy, M., et al., 2013; Kim, H., Yang, C., 2013; Chen, J. P., et al., 2016; Chen, X. D., et al., 2018)。Tahara 等(2008)对 DTMB 5415 进行了首部优化,并采用模型试验对优化船型的阻力进行了不确定性验证分析;Diez 等(2015)发表了一篇关于 DTMB 5415 的优化文章,在优化之前对 DTMB 5415 进行了数值模拟,并与详细的模型试验结果对比,以此验证与确认了数值模拟的可靠性。

依靠计算机技术迅猛发展,数值仿真方法或者得到了巨大发展,并且已经广泛应用于船舶水动力性能评估和预报。一类是基于势流理论的数值分析方法,如计算兴波阻力的 Michell 积分方法(基于 Neumann-Michell 理论的 NMShip-SJTU 求解器以及



SSF 求解器)、Neumann-Kelvin 方法(WARP 求解器)、Dawson 方法(ITU-Dawson 求解器)、基于 Kelvin 及 Rankine 源等面元法(SWAN2 2002), 计算耐波性的切片理论(SMP 求解器)、面元法(FreDOM 求解器)等, 计算操纵性能的细长体理论、面元法等。

不少学者做了船舶兴波阻力的针对性优化: 张宝吉等(2009)对某集装箱船进行了首部优化, 在优化过程中采用了 Michell 积分求取兴波阻力, 并对优化船型再采用 Rankine 源法计算了兴波阻力以验证优化效果; Zhang 等(2009, 2015)对 S60 进行了优化设计, 优化过程中阻力计算采用的是 Rankine 源法计算; 张宝吉等(2011)对巡逻艇进行水动力性能优化, 采用 Rankine 源法计算阻力; 李胜忠和赵峰(2011)对 KCS 球首优化过程中, 采用了 SHIPFLOW 进行兴波阻力计算; 詹成胜等(2012)对某集装箱船首部优化过程中, 采用 Rankine 面元法计算兴波阻力; Wei 等(2016)对 KCS 的设计航速下的兴波阻力系数进行不确定性优化, 其中兴波阻力由势流软件 SHIPFLOW 求解; Liu 等(2017)在研究敏感度分析方法时以 KCS 为优化对象, 在优化过程中兴波阻力采用势流软件 SHIPFLOW 求解。

在船型优化设计中, 如果目标函数是总阻力, 一般使用兴波阻力和摩擦阻力之和近似代替, 其中兴波阻力用势流方法计算, 摩擦阻力采用 1957ITTC 公式计算。该方法对于局部流场特性无法兼顾, 只能优化全局流场性质。Kandasamy 等(2013)对喷水推进 Delft 双体船进行了总阻力优化, 其中兴波阻力采用了势流求解器 WARP 进行数值评估; Wang(2015)在其博士论文中对 Wigley、DTMB 5415、DTRC5279、Series 60、Wedge hull 和 JHSS Series 共 6 条船的总阻力进行优化时兴波阻力均采用 SSF 势流求解器评估, 摩擦阻力成分采用 1957ITTC 公式计算; Serani 等(2016)对 DTMB 5415 的静水阻力优化, 采用 WARP 求解的兴波阻力; Huang 和 Yang(2016)对一个三体船进行了总阻力优化, 其中兴波阻力计算采用的是 Neumann-Michell(NM)势流理论, 摩擦阻力采用 1957ITTC 公式计算; Yang 和 Huang(2016)在其综述文章中以优化 S60 总阻力为例介绍了团队研究工作, 其中兴波阻力成分用 NM 理论计算, 摩擦阻力成分采用 1957ITTC 公式计算; Wu 等(2017)对 DTMB 5415 三个航速下的总阻力进行多目标优化, 其中总阻力中的兴波阻力采用 NMShip-SJTU 势流求解, 摩擦阻力采用 1957ITTC 公式计算。当然也有少数是用兴波阻力和叠模计算所得的粘性阻力之和代替(Miao, A. Q., Wan, D. C., 2020)。

关于船舶耐波性的优化, 通常都是将其与阻力同时优化: Peri 等(2003)对 DTMB 5415 进行了阻力和耐波性优化, 其中采用了线性势流方法计算阻力以及采用了切片法求解船舶纵摇和升沉幅值; Tahara 等(2007)对 DTMB 5415 进行了阻力和耐波性



能综合优化,其中耐波性能采用了切片理论进行计算; Kim 等(2009)对 DTMB 5415 船的兴波阻力系数和耐波性进行优化,其中兴波阻力系数采用 NM 理论进行计算,耐波性采用 Bales 公式计算;冯佰威(2011)在其博士论文中对油船、集装箱船等的优化过程中,采用势流求解器 SHIPFLOW 计算兴波阻力,采用自主开发的切片法计算耐波性;邱辽原等(2011)对某油船进行阻力和耐波性一体化优化时,采用 SHIPFLOW 计算兴波阻力以及采用切片法计算耐波性;Diez 等(2015)对 DTMB 5415 的阻力和耐波性能综合优化,这一篇文献是船型优化领域非常具有代表性和参考性的研究,四个研究团队针对同一艘船采用不同的水动力性能评估求解器进行了优化:其中 INSEAN/UI 团队采用 WARP 求解兴波阻力和 SMP 求解器预报耐波性,ITU 团队采用自主开发的势流求解器 ITU-Dawson 求解兴波阻力和自主开发的切片法求解器 ITU-SHIPMO 求解耐波性,NTUA 团队采用基于 Rankine 面元法的商业势流软件 SWAN2 2002 求解兴波阻力以及基于切片法的势流求解器 SPP-86 求解耐波性。

由此可见,目前基于势流理论的船型优化设计研究已经很多,该类方法理论较为成熟,对于相对简单的问题数值结果具有一定可靠性,网格量较小因而计算成本较低。但由于忽略了粘性影响,有时优化出来的船型比较复杂奇怪。比如前面所述的某油船优化算例(图 1-2)以及图 1-3 所示的 Delft 双体船优化算例,优化目标中的总阻力采用的是线性势流方法计算兴波阻力与平板摩擦公式计算的摩擦阻力之和近似,因此导致优化的船体型线呈波浪形的一个原因可能是没有考虑粘性影响,从而忽略了可能的流动分离现象,因而优化结果需要进一步的验证。

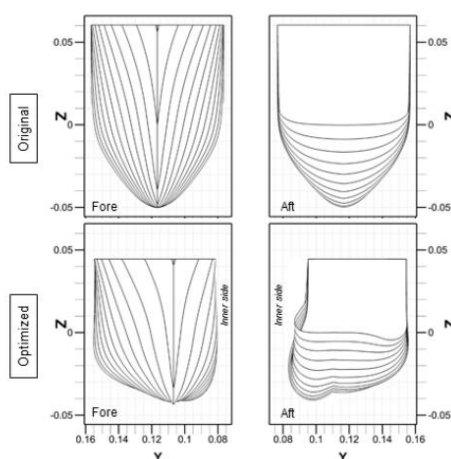


图1-3 基于势流方法的 Delft 双体船优化结果(Campana, E.F., et al., 2015)

Fig.1-3 Optimal results of Delft catamaran hull lines based on potential flow theory(Campana, E.F., et al., 2015)



此外,对实际问题做了较多简化,计算精度不一定满足实际要求,无法得到详细的流场细节,因而很难从机理机制上去保证优化效果的可靠性。比如,Huang 和 Yang (2016)对 S60 船型进行三个航速 ($Fr=0.22, 0.27, 0.32$) 下的总阻力多目标优化,采用了 NM 方法计算兴波阻力和 ITTC1957 计算摩擦阻力,优化后得到的其中一个优化船型在 $Fr=0.22$ 航速下总阻力增加 0.92%,在 $Fr=0.27$ 航速下总阻力降幅 14.21%以及在 $Fr=0.32$ 航速下总阻力降幅 13.48%。为了进一步确认优化结果的可靠性,首先采用了粘性求解器对优化船型和母型船都进行数值模拟,得到的阻力变化: +3.8% ($Fr=0.22$)、-8.07% ($Fr=0.27$) 和 -14.5% ($Fr=0.32$),得到的自由面波形对比如图 1-4 所示,可见在 $Fr=0.22$ 时自由面波高增加明显,可见兴波阻力有所增加,此外,总阻力增加的另一个原因可能是在 $Fr=0.22$ 时,粘性阻力占比大,而势流方法未考虑粘性影响。最后又对优化前后的船型进行了模型试验,得到的阻力变化: +5.93% ($Fr=0.22$)、-6.42% ($Fr=0.27$) 和 -13.10% ($Fr=0.32$),由此可见,该优化船型在 $Fr=0.22$ 航速下的总阻力性能明显变差,也可以看出粘性求解器计算总阻力的结果与试验较为接近。

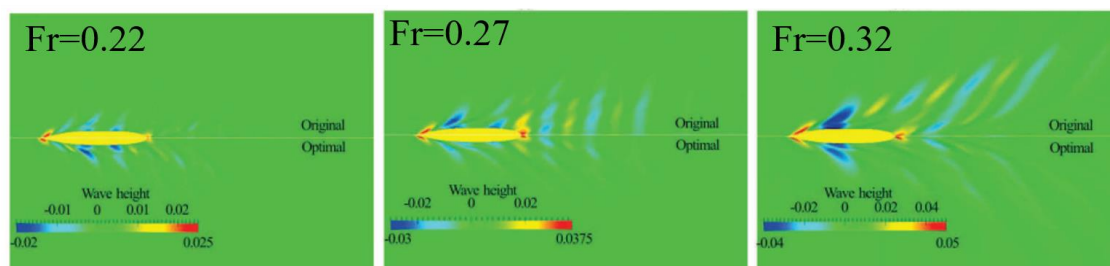


图1-4 基于 NM 方法的 S60 三个航速下的总阻力优化结果 (Huang, F. X., Yang, C., 2016)

Fig.1-4 Optimal results of S60's resistance for three speeds based on NM method (Huang, F. X., Yang, C., 2016)

另一类是基于粘流理论的数值计算方法,如考虑粘性的雷诺平均纳维斯托克斯方程(Reynolds Average Navier-Stokes, RANS),分离涡模型(Detached Eddy Simulation, DES),直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)等。在船型优化中粘性求解器一般采用 RANS 模型就满足高精度需求。粘流 CFD 方法所得数值结果精度通常较高,并且能够捕捉到很多详细的流场细节。随着高性能计算机技术的迅猛发展,粘流 CFD 技术得到广泛应用;依赖模型试验,其可靠度也得到验证和认可;相比较模型试验,成本较低,因此也可以部分替代和减少模型试验。

目前国内外形成了一系列相关应用软件:一种是国际上著名的商业软件有 CFX、Fluent、Star-CCM++等;船型优化设计中采用此类商业软件进行水动力性能评估的研



究较多：李胜忠（2012）在其博士论文中对驱逐舰 DTMB 5415、6600DWT 散货船以及 44600DWT 散货船进行水动力构型优化设计时，总阻力、伴流场均采用 RANS 方法计算，其中伴流场采用了叠模计算，软件采用的是 Fluent。Zhang 等（2018）对 DTMB 5415 进行首部优化，采用 RANS 方法计算总阻力。如图 1-5 所示为李胜忠博士对 6600DWT 散货船桨盘面伴流场优化后的结果，可以很明显看出优化后的伴流场更均匀，周向“波动”比母型船小，这可以提高螺旋桨的推进效率，改善母型船的推进性能，因此这充分体现了粘流理论在对船舶局部流场特性进行优化时的巨大潜力。这类方法优势就是在计算水动力性能方面很成熟，计算效率相对高，但一般需要二次开发，不同的软件输入输出信息都不同，编程语言也不尽相同，因此二次开发难度系数大，复杂度高。

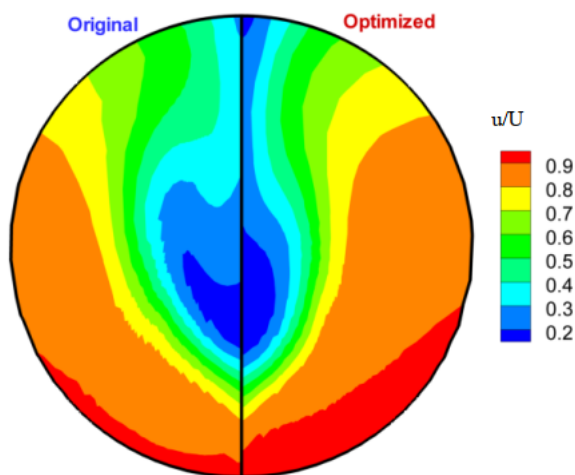


图1-5 某散货船的桨盘面伴流场优化结果（李胜忠，2012）

Fig.1-5 The optimal result of the wake performance at disk for a bulk carrier

另一种是国内外各研究团队基于 C++、Fortran 或者 matlab 语言独立开发的应用于求解船舶水动力性能问题的非商用求解器（CFDSHIP-Iowa 求解器、MGShip 求解器、naoe-FOAM-SJTU 求解器）。Tahara 等（2008）对国际标准模型 DTMB 5415 实施了两套水动力构型优化方案，区别在于总阻力计算工具不同，分别为两套自主开发的 RANS 求解器 CFDSHIP-IOWA 和 MGShip；Tahara 等（2011）对 Delft 双体船的优化过程中同时采用了势流求解器 WARP 和粘流求解器 CFDSHIP-IOWA 评价目标总阻力，所得结果显示后者所得优化船型的降阻效果更优；Kandasamy 等（2013）对 Delft 双体船进行总阻力多目标优化时，分别采用势流求解器 WARP 和 URANS 求解器 CFDSHIP-IOWA 求解；Kandasamy 等（2014）对 DTMB 5415 进行水动力性能优化



时，采用粘流求解器 CFDShip v4.5 求解总阻力；Chen 等（2015）对 Delft 双体船的总阻力进行优化，优化过程中阻力采用粘流求解器 CFDShip-IOWA 计算；吴建威等（2015）对 KCS 船进行了总阻力和桨盘面伴流性能综合优化，其中总阻力中的兴波阻力采用势流方法计算，而粘性阻力和尾部桨盘面伴流性能采用粘流求解器 naoe-FOAM-SJTU 对叠模求解得到；Miao 和 Wan（2017）对 DTMB 5415 的总阻力和耐波性能进行综合优化，优化过程中采用粘流求解器 naoe-FOAM-SJTU 求解阻力和耐波性。

1.2.3 最优化技术的研究进展

最优化技术是解决船体型线优化设计问题的必要手段。它使得当前船型优化设计区别于传统的“优选”模式，通过数学理论方法为设计者提供科学决策的依据。如何能够快速准确地在整个设计域搜索到最优解是船型优化设计的研究重点之一。

近些年来，在船型优化设计领域，有很多学者应用不同的优化算法对各种船型进行了优化设计。目前优化算法主要分成两大类：梯度下降优化算法和随机搜索优化算法（刘晓义，2017），如图 1-6 所示。

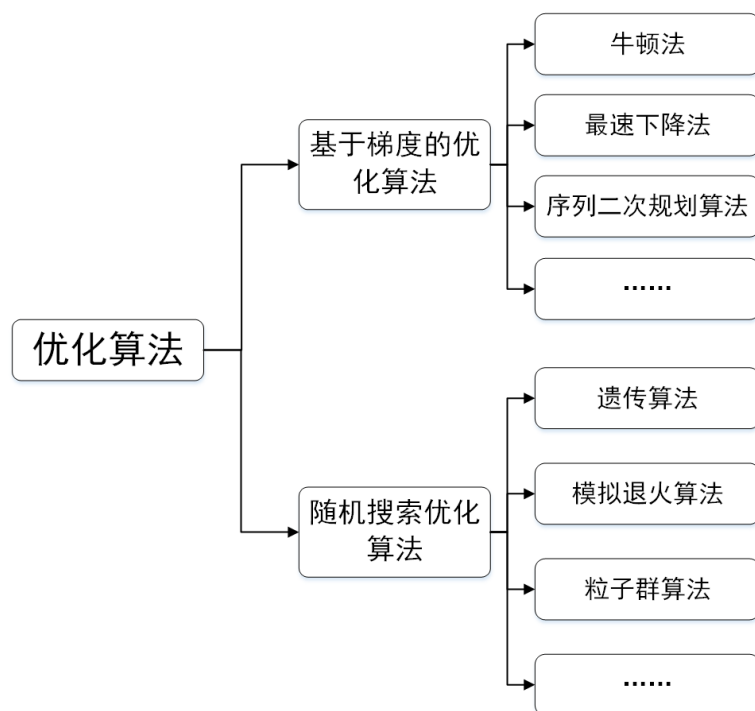


图1-6 目前主要优化算法的分类

Fig.1-6 The main optimization algorithms used in ship design optimization at present



常用的梯度下降优化算法有：最速下降法、牛顿法、共轭梯度方法、序列二次规划方法等。由于此类优化算法发展较早，相对成熟，计算效率较高、优化过程较快，因此在工程领域中已经有大量成功的应用，也是最先开始用来进行船型优化设计的算法，但这类算法的前提是都必须首先能够求出目标函数的梯度。不少学者对这类优化算法在船型优化设计领域的应用进行了探索：Tahara 等（1999a, 1999b, 2000）采用序列二次规划算法对油船进行水动力性能优化；Peri 等（2001）分别采用了三种算法（共轭梯度法、最速下降法以及序列二次规划法）对某油船进行了首部型线优化设计；Kim 等（2009）采用序列二次规划法对 KCS 进行了优化构型；张宝吉等（2009）采用非线性规划法对某集装箱船进行了首部构型优化；张宝吉和马坤（2010）采用非线性规划法对某高速水面舰船前半体进行优化设计；张宝吉等（2010）采用非线性规划法对 Wigley 进行了船型优化设计；Diez 等（2015）采用序列二次规划法对 DTMB 5415 进行阻力和耐波性能的优化求解；Zhang 和 Miao（2015）对 S60 采用了非线性规划法进行总阻力优化；刘晓义等（2016）采用序列二次规划算法对 S60 船型进行了优化设计；Zhang 等（2018）采用非线性规划法对 DTMB 5415 的总阻力进行了优化。

随着最优化理论的迅猛发展，随机搜索优化算法备受瞩目。常见的随机搜索优化算法有单目标遗传算法（Genetic Algorithm, GA）、多目标遗传算法及改进算法（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA 以及 NSGA-II）、粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）、人工蚁群算法（Artificial Bee Colony, ABC）、模拟退火算法（Simulated Annealing, SA）、进化算法（Evolutionary Algorithm, EA）等。应用此类算法不必求解目标函数的梯度，而只需要在优化过程中求解目标函数值，因对无法求解目标函数梯度的问题具有非常强的适用性和稳健性。此外，随机搜索优化算法能够更加有效地搜索到全局最优解，从而避免局部收敛。

Peri 等（2003）采用遗传算法对 DTMB 5415 进行了总阻力和耐波性优化；Pinto 等（2004）研究了各类优化算法在船型优化中的应用，认为全局优化算法更加适用；Tahara 等（2006）分别采用 SQP 和 MOGA 对某油船尾部线型进行优化；Tahara 等（2008）采用 GA 对 DTMB 5415 进行了阻力和耐波性的优化；Kandasamy 等（2009）采用进化算法对某高速双体船进行了阻力的多目标优化；Kim 等（2010）对 DTMB 5415 的全船型线采用单目标和多目标遗传算法进行了优化设计；冯佰威（2011）的博士论文中采用单目标和多目标遗传算法完成了油船、集装箱船等的优化设计研究；张宝吉等（2011）采用遗传算法对某高速巡逻艇进行了总阻力优化；张宝吉（2012）将遗传算法和非线性规划算法结合形成了新的混合优化算法，并将其应用于 Wigley



船的兴波阻力优化；詹成胜等（2012）采用遗传算法对 1300TEU 集装箱船进行了阻力优化；Tahara 等（2012）采用 RC-MOGA 算法对 Delft 双体船进行了多目标优化算法；吴建威等（2015）对 KCS 采用了 NSGA-II 算法进行了水动力优化；Zhang 等（2016）采用了多岛遗传算法对某集装箱船进行了总阻力优化，该算法是对遗传算法的改进，解决了多个极值容易陷入局部优解问题；Wu 等（2017）采用了 NSGA-II 对 DTMB 5415 的三个航速下的总阻力进行了优化。

Campana 等（2009）对 PSO 算法进行了详细研究和验证；Campana 等（2009，2010）对 FILLED，DDFPSO，DIRECT 优化算法进行了研究，以集装箱船 S175 顶浪航行时的垂荡幅值响应算子为优化目标，采用 FILLED 算法达到收敛进行了 320 次高精度模拟，而采用 DDFPSO 以及 DIRECT 优化算法对目标函数优化时，达到相同的优化效果进行了 600 次高精度数值模拟，从而验证了 FILLED 算法本身具有的局部搜索能力加快了全局最优搜索的速度。

Tahara 等（2011）采用 PSO 对 Delft 双体船进行了单目标阻力优化以及多目标的阻力和耐波性优化；李胜忠和赵峰（2011）采用 PSO 对 KCS 进行了兴波阻力优化；李胜忠（2012）在其博士论文中重点研究了 PSO 并提出了改进的 IPSO 算法，将其应用于多条船型的优化设计；李胜忠等（2013）采用 MOPSO 对低速肥大型船尾部进行多目标优化设计；Diez 等（2012）采用 PSO 对帆船的水弹性进行了优化。

Kandasamy 等（2013）分别采用了 PSO 和 MOGA 对高速双体船进行构型优化；Kandasamy 等（2014）采用 PSO 算法对 DTMB 5415 的水动力和结构进行多学科优化；Mcallister 等（2015）采用 PSO 对 DTMB 5415 进行总阻力优化；Diez 等（2015）采用了 DPSO 对 Delft 双体船兴波阻力进行了优化；Chen 和 Diez（2015）进行船型优化时，采用了两种优化算法：确定性粒子群算法（DPSO）和随机性粒子群算法（SPSO），结论是在达到相同的性能提高量的结果下，DPSO 所需的计算成本较 SPSO 低。

Diez 等（2016a; 2016b）采用 DPSO 和 LS-DF_PSO 对 DTMB 5415 进行了多目标的变形优化；Campana 等（2016）分别采用了全局优化算法 DIRECT、DIRMIN 以及 DIRMIN-2 对 DTMB 5415 的阻力进行优化，发现 DIRMIN 和 DIRMIN-2 收敛较快；Serani 等（2016）对 PSO 算法的参数选择进行了研究，给出了参数的具体设置，并将其应用到高速双体船的阻力优化问题上；Serani 等（2016）采用了四种优化算法：DIRECT、DPSO、DIRMIN-2 以及 LS-DF_PSO 对 DTMB 5415 进行了构型优化，认为全局/局部混合算法 DIRMIN-2 比 DIRECT 收敛更快，而 LS-DF_PSO 比 DPSO 收敛得到的优化效果更好；Campana 等（2018）对 DIRECT 算法进行了进一步研究



加入了局部算法称为 MODIR 算法；Diez 等（2017）采用了多目标的 DPSO 算法对驱逐舰进行了船型优化。

Huang 等（2014）采用人工蚁群算法（ABC）以及改进的人工蚁群算法（IABC）对 DTMB 5415 进行了船型优化，IABC 算法较 ABC 算法而言，每次迭代使用了已保存的优秀个体，采用了精英策略，所以收敛更快，并且得到更大的阻力降幅；Huang（2015）又对 IABC 算法进行进一步改进形成新的 IABC 算法（NIABC），在使用蚁群的解搜索方程中采用了一个块摄动策略，使得收敛更快。同年采用多目标 IABC 算法成功对三体船进行了三个航速下的总阻力性能综合优化；Huang 和 Yang（2016）采用多目标的人工蚁群算法（MOABC）对三体船的中心片体进行了优化设计。

1.2.4 近似技术的研究进展

近似技术，即构建近似模型或代理模型，一般也被称为“黑箱模型”，主要是采用合理的数学模型分别建立优化问题中的设计变量（即船型变换参数）与目标函数（即关注的水动力性能指标）之间以及设计变量（即船型变换参数）与约束函数（一般是船体形状参数约束）之间的直接映射关系，可以解决目前在优化进程中应用高精度 CFD 方法评估个体（每条新船）的水动力性能（即目标函数）所造成的响应时间长，计算费用高等问题。它是推进 CFD 技术应用于船型优化设计问题的有效途径。近似技术主要包括试验设计采样和近似模型构建两个部分。使用近似技术首先需要采用合理的方法在设计空间内采样。试验设计（Design of Experiment, DOE）正是一种有效的数理统计学采样方法，优秀的试验设计应该满足样本点在设计空间内“充满”即满足均匀性和正交性，能够有效地降低样本点数，从而降低数值计算的计算时间和成本。

目前主流的采样方法是正交试验采样方法（Orthogonal Experimental Sampling）、拉丁超立方采样方法（Latin Hypercube Sampling, LHS）、最优化拉丁超立方采样方法（Optimized Latin Hypercube Sampling, OLHS）、均匀试验采样方法（Uniform Experimental Sampling）、Sobol 方法等。Tahara 等（2008）采用了正交试验采样方法对 DTMB5415 的设计空间采样；Tahara 等（2011）采用了正交试验方法对 Delft 船型优化进行采样；李胜忠（2012）对 DTMB 5415 球首构型优化时采用了 LHS 方法采样；常海超等（2013）对 OLHS 以及均匀设计进行研究，认为采用均匀试验设计采样建立近似模型精度更高；Volpi 等（2015）采用拉丁质心 Vorono 网格化采样方法对 Delft 船型优化进行初始采样；Wang（2015）在其博士论文中的船型优化均采用的是 LHS 方法；吴建威等（2015）对 KCS 船进行优化设计时采用的是 OLHS 采样；



董素贞等（2015）在对 KCS 进行船尾型线设计时采用了均匀试验设计方法；Huang 和 Yang（2016）对三体船进行中心片体优化时采用了 LHS 方法进行采样；Wu 等（2017）对 DTMB 5415 进行优化设计时采用了 OLHS 采样；Liu 等（2017）提出了考虑减少估计方差的积分方式来改进的 Sobol 采样方法，称为 ISobol 方法，并将其应用到 KCS 前半船型线优化设计中；Diez 等（2018）在对 Delft 双体船进行优化时采用蒙特卡洛采样方法进行初始采样。

根据合理的方法选定样本点后就可以建立近似模型，目前流行的模型有：响应面模型（Response Surface Model, RSM）、克里金模型（Kriging Model）、神经网络模型（Artificial Neural Network, ANN）、径向基函数模型（Radial Basis Function, RBF）、支持向量机（Support Vector Machine, SVM）。在优化进程中目标函数的评价由近似模型代替高精度 CFD 评估，加快优化速度。因此，近似模型的精确度尤为重要，可以通过交叉验证（Cross Validation, CV）、降低模型方差等提高可靠性。另外，一般采样都是预先给定所需样本点数 n ，使得 n 个样本点“充满”设计空间，并没有考虑目标函数（性能）在设计空间的差异，所以有时不能保证近似模型在局部的预报精度。通过一定的准则有序添加新样本点（比如选择近似模型方差最大处）构建动态近似模型（DRBF、DKG）可有效地改善局部精度，提高近似模型预报精度。

Tahara 等（2011）对 Delft 双体船进行优化时采用了 Kriging 近似模型；李胜忠（2012）在优化 DTMB 5415 总阻力时采用了三个响应面模型构建三个目标总阻力预报的近似模型；常海超等（2013）在优化 KCS 时采用了神经网络模型构建兴波阻力近似模型；董素贞等（2015）采用了神经网络模型构建 KCS 的阻力和伴流性能近似模型来进行优化设计；Volpi 等（2015）对 Delft 双体船进行优化时分别采用了 DRBF 和 DKG 方法构建近似模型；Chen 等（2015）以 Delft 双体船为优化对象，采用了四种近似模型：RBF 神经网络方法、Kriging 方法、支持向量机方法以及多谐波样条方法，得出 RBF 神经网络方法更有效；Leotardi 等（2015）采用了 RBF 方法构建近似模型优化 DTMB 5415；Campana 等（2015）在优化 Delft 双体船时采用了动态近似模型（DRBF）；Diez 等（2015）在优化 DTMB 5415 时采用了神经网络方法（ANN）构建近似模型；Wang（2015）在其博士论文的船型优化案例中均采用了 Kriging 方法构建近似模型；Serani 等（2016）采用了 RBF 方法构建近似模型优化 DTMB 5415；Zhang 等（2016）在对 KCS 船型优化时采用了 RBF 神经网络近似模型；Huang 和 Yang（2016）在对三体船进行优化时采用了 RBF 方法构建近似模型；Wu 等（2017）采用了 Kriging 方法构建近似模型优化 DTMB 5415；Liu 等（2017）在对 KCS 进行前半体优化时采用了 Kriging 近似模型。



1.2.5 研究进展的综述

综合来看，国内外学者对于船型优化设计的四个主要关键技术已经进行了深入研究（万德成等，2020）：1）船型变换从最初的叠加融合方法到基于网格单元的修改函数法转为基于 NURBS 的船型变换和 RBF、FFD、平移法以及正交基函数的灵活船型变换方法，设计空间更加大且得到的船型更加光顺合理；2）优化目标的评估方法也从经验公式到势流理论再到粘性的 RANS（或 URANS）方法；3）采用代理模型代替优化过程中目标函数的高精度评价，大大降低计算成本，加快优化进程，从单一的 Kriging、RBF 等代理模型转向变精度代理模型、动态代理模型，以采用尽可能少的样本点构建尽可能高精度的代理模型；4）优化算法也在不断发展和改善，从简单的遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等到各类改进的全局/局部混合优化算法，尽可能加快收敛速度，从而尽可能减少目标函数评价次数以及尽可能达到全局最优解。此外，还采用 KLE 方法（Diez, M., et. al., 2015; Chen, X., et. al., 2015; Diez, M., et. al., 2016）科学地对复杂的船型优化设计空间的高维问题进行降维。

另外从实际应用的角度出发，船型从简单的船模 Wigley、S60、DTMB 5415、KCS 转向实用船型散货船、集装箱船、巡逻护卫舰、双体船、三体船等；目标水动力性能也从简单的单个航速下的兴波阻力到多个航速下的兴波阻力（或总阻力）优化再到同时考虑阻力性能，推进性能或耐波性能综合水动力性能，研究的也不仅仅是单个航速下的静水阻力，也开始考虑船舶在波浪情况下所受阻力以及运动情况。

对比来看，相较于国外，国内基于粘流理论的船型优化设计还处于探索和发展阶段。由于国内的计算流体力学技术发展相对比较晚，因此基于粘流理论的船型优化仍有巨大发展空间。总结国内船型优化发展面临的瓶颈如下：一是受限于粘性 CFD 数值模拟求解器，目前主流是商业软件，如 Fluent, Star-CCM+, Shipflow 等，基于此类软件较难进行二次研究开发；二是寻找更加有效的船型变换方法，使得变形参数尽可能少，变形空间尽可能大，变形船型尽可能合理；三是粘性流场数值模拟计算时间和成本太高，除了依赖超级计算机，需要有更加有效的方法实现基于粘流理论的船型优化设计，这是制约基于粘性流场数值模拟船舶综合水动力性能进行船型多目标优化设计的关键问题以及重大难点之一；四是对船舶综合水动力性能进行优化是一项复杂的工程实际问题，如何构建合理的综合优化模型，选择影响阻力性能、耐波性能、操纵性能等合适的全局和局部船型参数作为设计变量是一大难点；五是优化设计过程中各模块之间数据集成问题，如何使得各模块之间数据有效传输和共享也值得关注。



1.3 船型优化设计的软件开发

1.3.1 国外的软件开发

1) ISIGHT 平台

ISIGHT 是由 MIT 的博士 Siu S.Tong 在上个世纪 80 年代左右提出并领导开发完成的，最早属于美国 Engineous 公司，但 2008 年该公司被法国达索公司收购。它实际上是一个集成平台，包括四个功能模块（见图 1-7）：首先整个优化设计问题通过问题定义模块全部预先定义好；然后优化问题求解的每一个过程可以通过不同的商业或自编程序解决，它们都集成在过程集成模块；并且有一个求解监视器实时显示和监测优化过程和优化效果，直到优化结束；问题定义模块、过程集成模块以及求解监视器都是在任务管理模块的控制协调下完成的。ISIGHT 已经广泛应用于许多实际工程领域，包括航空、航天、汽车、兵器、船舶、机械等。船型优化最早也是借助于 ISIGHT 平台得到发展（Feng, B.W., et al., 2009; Feng, B. W., et al., 2011; Wei, X., et al., 2016; Zhang, B. J., et al., 2018）。

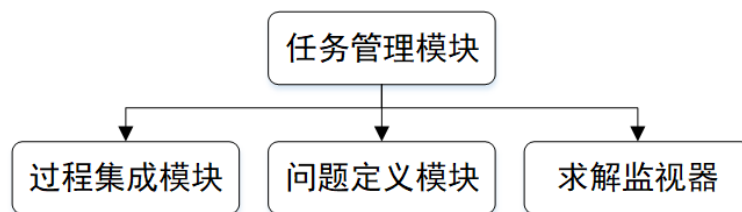


图1-7 ISIGHT 集成平台

Fig.1-7 ISIGHT integrated platform

2) CAESES 软件

CAESES 由德国 FRIENDSHIP SYSTEMS 公司研发，是应用于设计前端的计算机辅助工程集成系统，是一款包含全参数化几何建模及数值仿真的优化设计软件（见图 1-8）。目前在船舶、航空航天、汽车、叶轮机机械等各个领域各类产品的设计及性能优化工作中被广泛应用。其特色之一是具有强大的复杂曲面参数化建模功能，可以与目前市面上绝大部分的商业软件、开源代码及企业内部自主开发的 CFD 求解器等完美耦合；特色之二是具有多种经典优化算法进行单目标和多目标最优化求解。CFD 的高精度仿真模拟优势在 CAESES 软件中得到最大程度发挥，优化工作流程高度自动化，设计效率相对较高，并且得到了工程实用验证（Bolbot, V., et al., 2016; Berrini,



E., et al., 2017)。目前 CAESES 在国内由南京天沅有限公司代理，已经在国内一些主要的船舶研究所、设计院得到广泛应用。

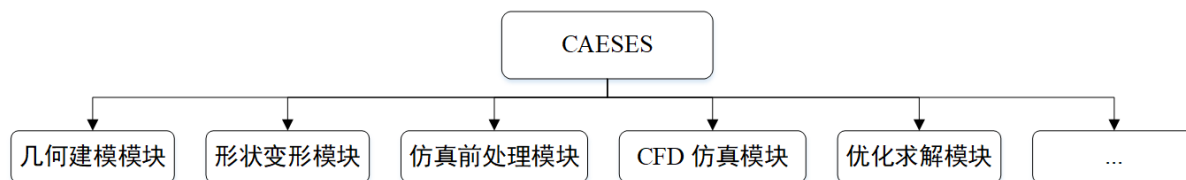


图1-8 CAESES 优化设计软件

Fig.1-8 CAESES optimization design software

3) OPTIMUS 平台

OPTIMUS 是比利时 Noesis Solutions 公司的著名集成优化软件。它具有多学科的仿真集成功能，即能够集成用户的多学科仿真操作并进行自动化分析，达到设计-修改-再分析高度自动化；依赖成熟的现代设计技术（试验设计、敏感度分析、响应面建模等）实现综合优化和自动化分析；多学科涉及几何造型、结构分析、计算流体力学、控制、动力学、冲击碰撞、震动噪声和疲劳等领域；能够集成相关的 CAD/CAE 商业软件 and 用户自主开发的求解器。目前 OPTIMUS 在多个工业领域得到应用：航空航天、船舶、新能源、汽车、机械等。

4) PHX Model Center 软件

PHX Model Center 是美国 Phoenix Integration 公司所属的一款优秀的产品多学科设计优化软件。它在产品优化设计全生命周期中，具有工具封装、过程集成、多学科优化和分布式并行计算能力。但 ModelCenter 在船型优化领域方面应用较少。

5) 自主开发（In-house）的非商用求解器

意大利 INSEAN 水池的 Campana 教授及其团队在基于 SBD 技术的船型优化设计方面做了大量的研究与应用，包括兴波阻力求解器 WARP、基于切片法的耐波性求解器 SMP 等、船型变换求解工具、近似模型构建工具等。

美国乔治梅森大学杨驰教授团队自主开发了船型优化设计的相关程序，主要有结合 NURBS 和 RBF、平移法的船型几何表达和重构程序、简单的势流求解器 SSF（其中采用 Neumann-Michell 理论求解兴波阻力和采用 ITTC1957 公式求解摩擦阻力）、基于切片法的耐波性求解器 SMP、欧拉求解器 FEFLO 等。



1.3.2 国内的软件开发

冯佰威（2011）自主开发了船型参数化融合程序（V 1.0）以及船舶水动力性能多学科综合优化平台系统（SHIPMDO V1.0）；常海超（2014）自主开发了系列船舶优化设计相关软件：船型融合空间的典型样本点选取程序、船型全参数化空间的典型样本点选取程序、基于敏感度的船体型线优化设计软件、船型优化及船机桨匹配软件系统以及船舶操纵运动预报系统。

李胜忠（2012）在国内首次开发了一套船舶水动力构型自动优化设计框架（软件），针对船体首部的构型优化设计问题，已申请了软件著作权“船体艏部线型优化设计软件”，且该软件同时拥有软件界面（图 1-9）。该软件有四个主要功能模块：船体几何参数化表达与重构模块、网格重生成模块、船舶水动力性能评估模块以及优化策略模块，通过 C 语言集成四大模块。其中，船体几何参数化表达与重构模块采用 matlab 语言编写；网格重生成模块调用 gambit 商业软件，通过编写命令流形式实现自动化操作；船舶水动力性能评估模块调用 Fluent 商业软件实现，需要进行二次开发实现自动化计算；优化策略模块采用 C 语言编写。运用该软件进行船舶水动力构型设计可采用并行计算。



图1-9 船体艏部线型优化设计软件界面（李胜忠，2012）

Fig.1-9 GUI of ship bulb lines optimization software （李胜忠，2012）



上交大 CMHL 研究中心自主开发了基于势流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 1.0, 并已获得国家软件著作权。该求解器主要包括基于船体网格的船型变换模块、基于势流理论的水动力性能评估模块、近似模型和优化模块, 实现了船型的自动优化设计, 目前也已成功应用于单目标(单航速下的阻力性能)船型优化设计以及多目标(多航速下的阻力性能、阻力与耐波综合性能)船型优化设计。但主要还是针对兴波阻力性能的船型优化, 耐波性能主要采用的是经验公式; 针对总阻力的优化时, 总阻力由势流理论求解兴波阻力与 ITTC1957 公式求解摩擦阻力之和近似代替。

1.3.3 本文的软件开发

目前, 国内工程领域主要采用国外的商业软件进行船型优化设计, 虽然有一些高校学者形成了各自的船型优化程序, 但是具有自主知识产权且经过工程实际广泛验证的船型优化程序还有待进一步发展。

国内外开展的研究大部分都是基于商业软件来进行船型优化设计。除了 2013 年来开始受到极大关注的 CAESES 外, 其他商业软件都是通用软件, 并非针对船型优化问题的专业软件, 要想应用于船型优化问题, 一般都是需要进行二次开发, 而这类商业软件的代码封装性增加了二次开发的难度以及可行性。

本课题组基于势流理论 Neumann-Michell 自主开发了快速准确求解兴波阻力系数的势流软件 NMShip-SJTU, 基于此, 2015 年课题组自主开发了主要针对兴波阻力性能优化的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 1.0, 并将其成功应用到了系列船型(S60, Wigley, KCS, DTMB5415 等)的兴波阻力优化(吴建威, 2017; 刘晓义, 2017; 陈泰文, 2018; 漆小舟, 2018)。该求解器初步建立了船型变换(船型几何重构)模块、水动力性能预报模块、近似模型构建模块及优化求解模块。为了优化总阻力性能, 采用了 NMShip-SJTU 求取兴波阻力和通过 ITTC1957 公式求解摩擦阻力之和近似代替总阻力值, 从而完成总阻力性能优化。

但已有的求解器 OPTShip-SJTU 1.0 在应用上还存在一定的局限性: 首先, 船型变换主要还是针对船体曲面网格变形, 变形不够灵活, 较大的变形可能导致质量较差的船体曲面网格, 无法直接用于数值计算, 更不可能直接用于加工锻造; 然后, 只能通过 NMShip-SJTU 求得兴波阻力系数, 没有考虑到粘性影响, 因此, 优化目标只能是单一的兴波阻力或者近似的总阻力指标等。而课题组于 2012 年就在开源 CFD 平台 OpenFOAM 基础上自主开发了专门解决船舶与海洋工程问题的高精度水动力性能评估专业软件 naoe-FOAM-SJTU, 并引入了处理多级物体运动的重叠网格技术, 目前在船舶水动力问题求解上已取得不少研究成果(Shen, Z., et al., 2014; Zha, R., et al.,



2016; Wang, J., et al., 2016)。依靠粘流求解器 naoe-FOAM-SJTU 的优势, 本文进一步开发和发展了基于粘流理论的船型优化求解器, 将船型优化软件 OPTShip-SJTU 1.0 改进并升级为 OPTShip-SJTU 2.0, 以实现基于粘性流场数值模拟水动力性能的船型优化设计, 更好地解决实际船舶综合水动力性能设计问题。

1.4 本文的主要研究工作和创新点

1.4.1 本文的主要研究工作

本博士学位论文在了解国内外基于 CFD 技术的船型优化设计的最新研究进展、熟练掌握船型优化相关研究手段及重要结论的基础上, 总结出船型优化的关键技术问题, 并对此提出相应的解决方法, 构建基于粘流理论的船型优化设计求解器。随后, 将求解器主要应用到水下潜艇和水面船舶的阻力性能和伴流性能优化问题中, 在验证求解器可靠性的基础上, 对各优化案例所得优化结果开展深入的流场研究分析。论文的主要工作如下:

第一章主要是介绍了国内外基于 CFD 技术的船型优化研究进展以及船型优化软件开发情况, 阐明了目前国内船型优化可发展的空间及瓶颈。

第二章主要评述了基于船体网格的船型变换研究, 介绍了基于船体 NURBS 曲面的半参数化船型变换的意义及实现应用, 并针对船体 NURBS 曲面表达与变换开发了船体网格自动重生成工具。

第三章主要介绍了试验设计、近似模型的构建以及优化算法研究, 开发了最优化拉丁超立方采样方法和 Sobol 采样方法, 阐述了各方法的优缺点, 同时介绍了单目标和多目标遗传算法, 并开发了基于近似模型的高效全局优化算法(EGO)。并采用系列标准优化测试函数进行了相应的验证。

第四章主要介绍了船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0 的各功能模块、整个优化框架的搭建实现、流程图以及程序结构图, 并给出了标模 S60 单体船在设计航速下的总阻力单目标优化, 以此验证求解器 OPTShip-SJTU 2.0 的可行性和可靠性。采用了平移法和 RBF 相结合的方式实现了船舶整体以及艏部局部变形, 采用了 RANS 方法评估总阻力性能, 最终得到优化船型, 并将优化船型与母型船进行了详细的对比分析。

第五章主要介绍了基于 OPTShip-SJTU 2.0 实现了水下潜器的总阻力和伴流性能的优化构型设计。水下潜器的数值模拟采用单相流的 DES 模拟, 优化目标综合考虑了全局流场性能(总阻力值)和局部流场特性(桨盘面伴流性能)。该优化案例采



用了 FFD 方法对整个艇型变形从而改变艇型的总长、最大直径、平行中体长度以及围壳位置等,采用 EGO 算法进行寻优,最终得到了总阻力及伴流性能组合最优的优化艇型。

第六章主要介绍了基于 OPTShip-SJTU 2.0 实现了高速双体船的多航速总阻力优化。对高速 S60 双体船在两个航速下的总阻力进行了多目标优化,仅采用了 FFD 方法对片体首部进行了变形,同时将片体间距作为一个可变量,即设计变量之一,为了考虑片体间干扰,采用了 RANS 方法进行高精度数值评估总阻力值,最终得到优化船型,并对优化船型的流场细节进行了详细地分析,验证了基于粘流理论的船型优化在必须考虑粘性影响和流场特性方面具有强大的优势。

第七章主要是基于 OPTShip-SJTU 2.0 实现了低速肥大型船的总阻力和伴流性能优化。本章节充分考虑了粘性影响以及兼顾了局部流场特性,对标模 JBC 进行了总阻力和桨盘面伴流性能综合优化。首先对母型船的阻力、自由面波形,不同位置纵剖面的波形以及不同位置的伴流特性进行了精确的 CFD 数值计算并与模型试验进行了验证对比,然后采用 FFD 方法分别对船首和船尾变形,采用 EGO 方法最终得到了优化船型,并对其流场进行了对比分析。

1.4.2 本文的创新点

本博士论文借助粘性流场求解器 naoe-FOAM-SJTU,在已有的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 1.0 基础上进行新开发、改进以及补充完善功能模块,形成了基于粘流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0,并利用该求解器对水下潜器和不同的水面船舶进行了构型优化设计。论文的创新点体现在:

(1) 研究和开发了基于船体 NURBS 曲面的半参数化变形模块,以及船体曲面网格自动重生成模块,实现了船舶 CAD/CFD 一体化设计。

首先,除了原有的 RBF 方法,加入平移法和 FFD 方法,将船体 NURBS 几何表达与三种经典变形方法耦合,形成了基于船体 NURBS 曲面的半参数化变形方法,使得变形更加灵活多样。然后,研究和开发了基于映射法的曲面网格生成方法,很好地解决了由于船型优化问题涉及到批量船体及计算域网格生成问题,避免了考虑用商业软件进行批量网格划分的二次开发问题。最后,使得基于 NURBS 的船型几何重构与 CFD 高精度评估得以成功应用于船型优化设计问题中。

(2) 提出了单目标和多目标船型优化的高效全局优化新算法(EGO),有效实现了船型优化设计问题全局解的快速准确求解。



为了避免由于近似模型的局部精度不足导致优化求解陷入局部解的困扰，更为了解决基于粘流理论的船型优化求解数值计算量大的问题，将遗传算法与近似模型结合，形成了新的高效全局优化算法，其中单目标 EGO 算法采用 EI 函数最大加点准则实现优化循环，而多目标 EGO 算法采用欧氏距离 EIM 准则实现优化循环，最终实现了快速准确地求解船型优化设计问题的全局优化解，很大程度上提高了船型优化效率并且降低了计算成本。

(3) 形成了完全自主可控的基于粘流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0，可实现船舶全流场快速性优化。

改进开发了基于船体 NURBS 的半参数变形模块，实现了船体曲面自由、合理、有效的变形甚至大变形；开发了船体 NURBS 曲面网格自动重生成模块，实现了船体 CAD/CFD 一体化设计；开发了基于近似模型的船型优化求解模块，加快了全局最优船型的搜索速度，提高了优化效率；补充完善了近似模型构建模块，实现了动态近似模型的构建功能。

(4) 将船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0 成功应用于水下潜器和水面船舶的构型优化设计。

求解器充分考虑实际粘性影响，能够优化船舶的综合水动力性能，包括全局的总阻力性能和局部的桨盘面伴流性能；能够优化船舶整体型线，也能够针对局部形状进行优化；既能够优化水下潜器构型，又能够考虑自由面影响优化水面船舶型线。



15008826



第二章 船体 NURBS 曲面的半参数化变形方法研究

2.1 船体的几何表达及变形方法概述

船体的几何表达及变形技术是现代船型优化设计方法的关键技术之一，也是船型优化设计的第一环节。在船型优化问题中，船体的几何表达及变形技术直接决定设计空间的有效性、合理性以及范围大小。本章将重点对船体 NURBS 曲面的变形技术进行研究和开发，建立船体整体及局部精细变形方法，此外，还对船体 NURBS 曲面的网格自动重生成技术进行了研究和开发，为船型变换环节与后续数值计算环节提供了桥梁，实现了 CAD/CFD 的一体化设计思路。

1991 年，NURBS 已经被认定为定义工业产品几何形状的唯一数学方法，次年，NURBS 又被国际标准化组织归纳到规定独立于设备的交互图形编程接口的国际标准程序员层次交互图形系统（PHIGS）中，扩充了 PHIGS Plus。此外，Bezier、有理 Bezier、均匀 B 样条和非均匀 B 样条都被作为特例，统统归入到 NURBS 中。因此，大部分船舶 CAD 软件及工业制造也都是采用 NURBS 曲面表达船体三维轮廓及外形，它能够更加灵活地控制船体表面的曲度，从而得到更加光顺的曲面（见图 2-1）。船型优化学者早期也从船体 NURBS 曲面变形出发，通过直接移动 NURBS 控制点改变船型，以控制点的位移量作为设计变量，但是这种方法并没有被广泛应用，因为 NURBS 曲面表达船型较为复杂，设计变量较多；同时 NURBS 曲面变形后再进行性能评估前一般需要重新网格化，因此不适用于船型优化设计。

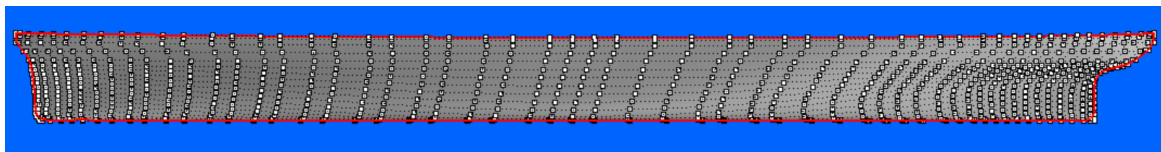


图2-1 S60 船体 NURBS 曲面

Fig.2-1 NURBS surface for S60 hull

在船型优化设计中另一种使用最广泛的船型几何表达方法是船体三角形或者四边形网格方法。在此表达基础上，通常采用数学函数（平移法、自由变形方法、径向



基函数方法、正交基函数)对网格点进行有序修改,从而改变船型。这类方法变形精确且唯一、操作简单、控制参数相对较少,既可以实现船体整体变形也可以实现局部的精确控制变形,得到的新船型可以直接作为后续性能评估的数值模型,该方法非常适用于船型优化设计。国内,李胜忠博士(2012)首次开发的一套船舶水动力构型自动优化设计框架(软件)中在对船型变形的做法是:对船体网格化曲面叠加 Bezier 曲面或者对网格点采用 FFD 方法得到新的船体网格曲面,然后将网格点导入 CAD 建模软件中,重新拟合得到船体 NURBS 曲面(见图 2-2);上交大 CMHL 中心自主开发的 OPTShip-SJTU 1.0(吴建威,2017)中的船型变换模块也是针对船体网格曲面施加平移函数、径向基函数以及自由变形函数然后改变船型。

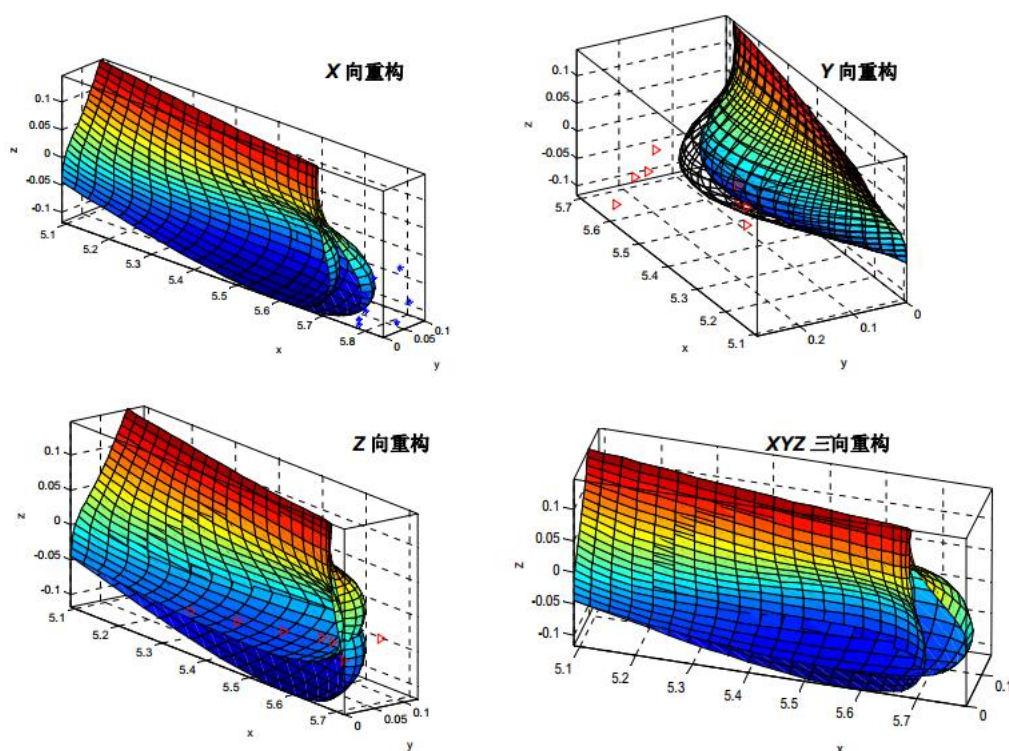


图2-2 DTMB 5415 船体基于 Bezier Patch 方法变形(李胜忠, 2012)

Fig.2-2 Deformation of DTMB 5415 hull based on Bezier Patch method(李胜忠, 2012)

基于船体平面网格的变形方法非常直观简单,所得新船型可直接用于数值仿真求解,一般无需进行网格重新生成。但也存在一定的问题:当进行较大的船体变形时,生成的船体网格质量可能较差,如图 2-3 所示为 OPTShip-SJTU 1.0 求解器基于 RBF 方法对 S60 首部大变形,尽管母型船采用了较密的网格,但从局部放大图 2-4 中可以看出变形后首部的网格质量较差,无法直接用于数值计算。因此,当对船体进行大变形时,船体网格质量变差,可能无法满足船体光顺要求,对后续数值计算也会造成



相应的误差，并且很难得到可供船厂加工制造的船体三维几何模型，除非重新进行三维建模。

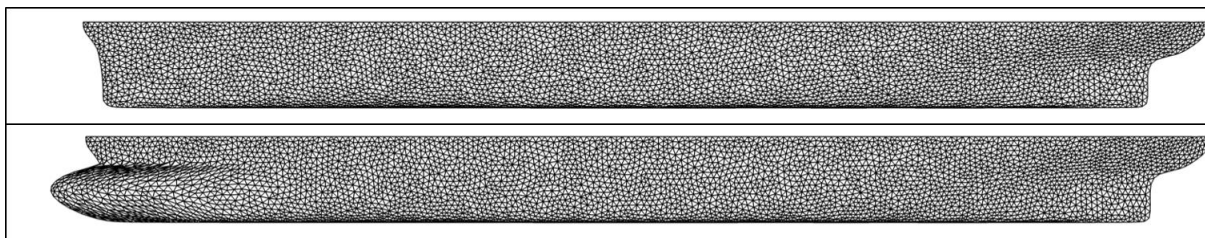


图2-3 基于 RBF 方法的 S60 船体网格首部变形

Fig.2-3 Deformation of surface mesh of S60 based on RBF method

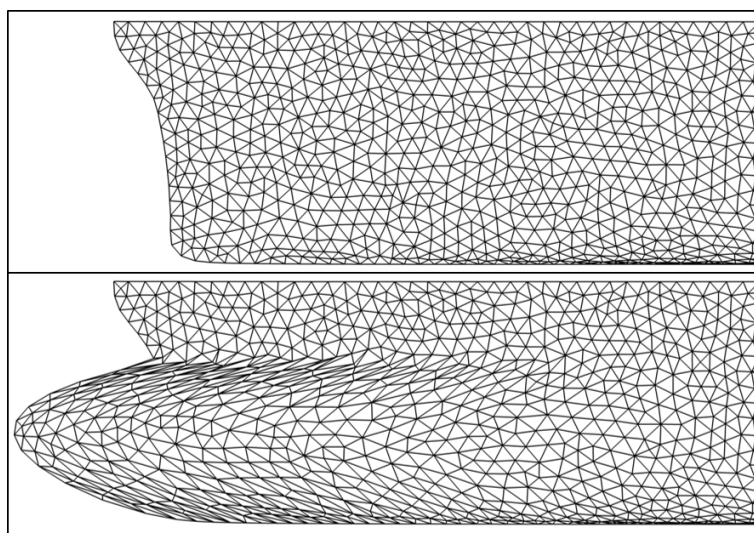


图2-4 S60 首部变形的局部放大

Fig.2-4 Local perspective of S60 bow deformation

因此，鉴于以上船体变形方法所存在的问题，本文在 OPTShip-SJTU 1.0 基础上采用 C 语言开发船体 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) 的半参数化变形方法。针对 NURBS 控制点，分别采用平移法、自由变形方法以及径向基函数方法对其进行移动操作，然后通过反求船体实际曲面的点位置得到新的光顺的船体 NURBS 曲面，实现船体 NURBS 曲面的整体或局部几何变形。此外为了后续数值计算以及自动优化，添加船体 NURBS 曲面网格自动快速重生成功能。



2.2 船体 NURBS 曲面表达方法

在 u 方向 p 次、 v 方向 q 次的 NURBS 曲面，可以定义为如下双参数分段有理矢值函数：

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j}}, \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (2-1)$$

其中， $\{P_{i,j}\}$ 为 NURBS 控制点， $\{\omega_{i,j}\}$ 为对应的权因子， $N_{i,p}(u), N_{j,q}(v)$ 分别是定义在节点矢量 U 和节点矢量 V 上的 B 样条基函数。节点矢量 U 和节点矢量 V 分别定义为：

$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\} \quad (2-2)$$

$$V = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, v_{q+1}, \dots, v_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \right\} \quad (2-3)$$

且有如下关系： $r = n + p + 1, s = m + q + 1$ 。定义分段有理基函数 $R_{i,j}(u, v)$ 为：

$$R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(u) N_{l,q}(v) \omega_{k,l}} \quad (2-4)$$

则式 (2-1) 可以简写为：

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u, v) P_{i,j} \quad (2-5)$$

当固定 u 参数时，形成三维空间上的 v 曲线；反之亦然。NURBS 曲面具有与 NURBS 曲线相似的几何特性，这里不再一一赘述。例如，关于局部修改性，如图 2-5 对一张 NURBS 曲面的部分控制点进行移动操作，移动图中绿色的四个控制点到新的位置，NURBS 曲面形状发生变化，但只是局部变形，其他部分仍然不变。这一点对于船型变换很重要，可以完全实现船体曲面的局部形状精确控制。

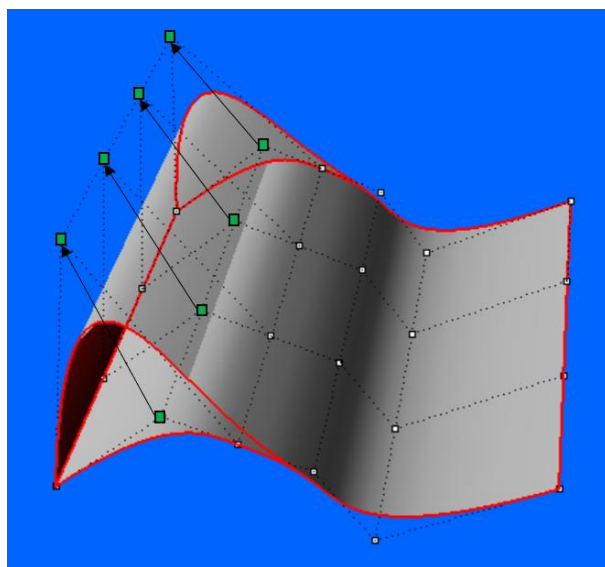


图2-5 NURBS 曲面移动控制点

Fig.2-5 Moving control points on a NURBS surface

为了提高船体曲面的光顺性，在船体曲面曲度变化较大的区域，诸如首部、前肩和尾部需要对 NURBS 曲面进行加密处理。本文添加了 NURBS 曲面节点插入功能，图 2-6 和图 2-7 展示了对 S60 船艏部进行节点插入后的 NURBS 控制点对比图，其中图 2-6 为未加密前，图 2-7 代表加密后（黄色点代表增加的 NURBS 控制点）。

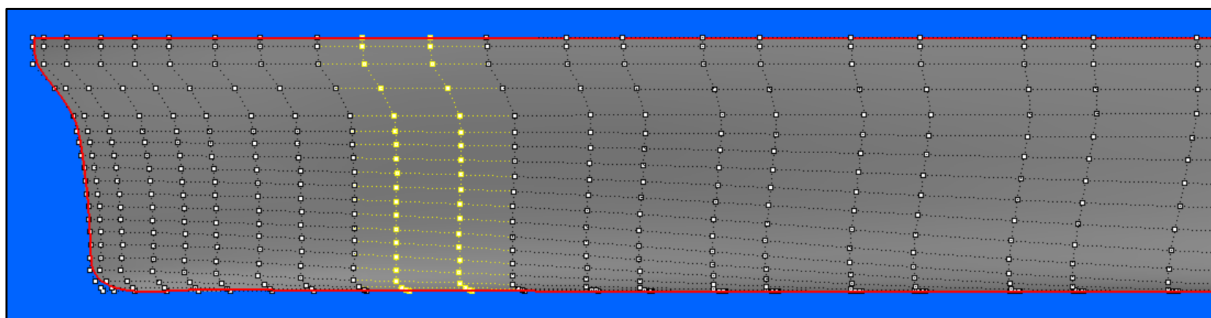


图2-6 原始 S60 船型艏部控制点分布

Fig.2-6 Distribution of NURBS control points of Wigley before knot insert method

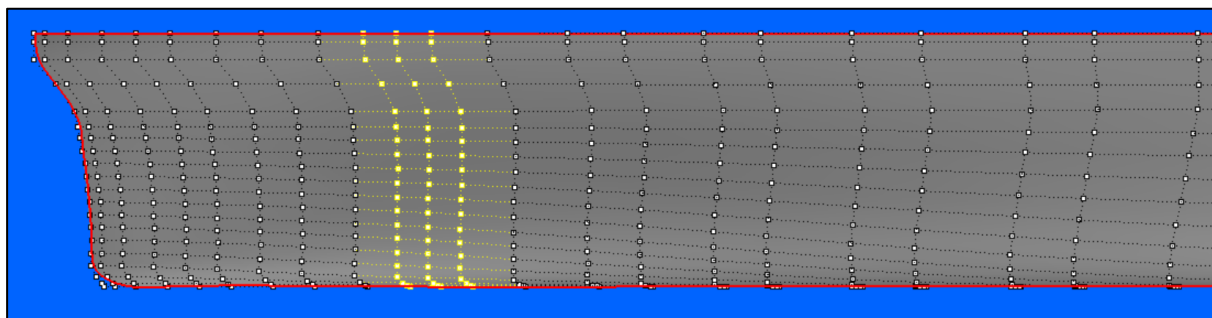


图2-7 节点加密后 S60 船型艏部控制点分布

Fig.2-7 Distribution of NURBS control points of Wigley after knot insert method

一般船体由两片及以上的 NURBS 曲面构成，相邻的两片 NURBS 曲面需要在紧邻的边界处具有相同的阶数才能无缝衔接，因此有时需要对 NURBS 曲面进行升阶或降阶处理。图 2-8 和图 2-9 展示了本文实现的曲线、曲面升阶功能。图 2-8 是一条 NURBS 曲线由三阶升至四阶，可见曲线形状不变；图 2-9 是一张 NURBS 曲面在 U 方向从三阶升至四阶，也可以看到前后 NURBS 曲面形状不变，而 NURBS 控制网格节点布置发生了改变。

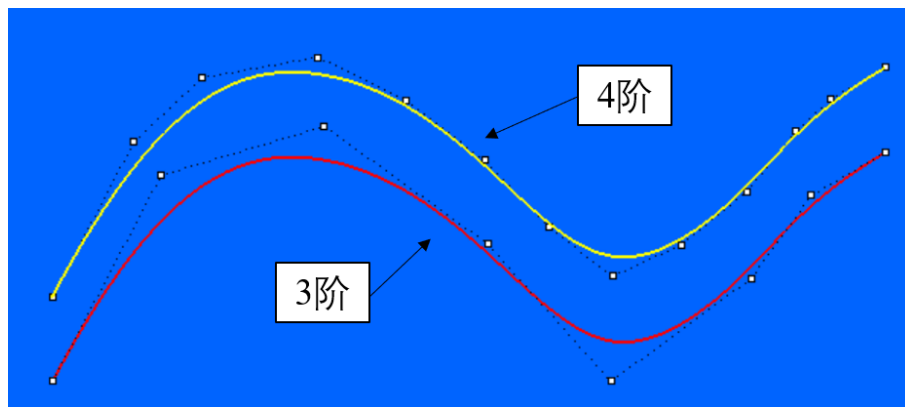


图2-8 NURBS 曲线由三次升阶为四次示意图

Fig.2-8 Ascending degree for a NURBS curve based on elevation algorithm.

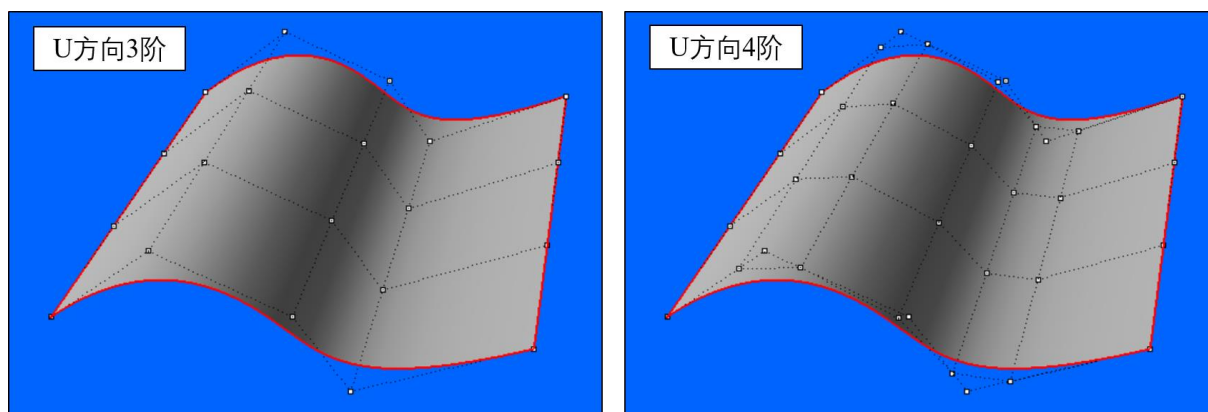


图2-9 NURBS 曲面由三次升阶为四次示意图

Fig.2-9 Ascending degree for a NURBS surface based on elevation algorithm.

在船型优化设计中,大部分母型船都是用 IGES 文件给出三维船体 NURBS 曲面。IGES (The Initial Graphics Exchange Specification) 的提出解决了数据在不同的 CAD/CAM 系统间进行传递的问题,它定义了一套统一的表示 CAD/CAM 系统中常用的几何和非几何数据格式以及相应的文件结构。如今,IGES 国际标准在实际工业系统得到广泛应用,IGES 文件在多数 CAD/CAM 软件中都能被识别,已经成为通用图形文件格式。本文基于 C++ 语言开发了船体 IGES 文件读写模块,主要功能是读入船型 IGES 文件,获取有用的船体 NURBS 形状信息,为下一步船体变形提供形状输入,并能够再次以 IGES 文件格式写出任一变形船型文件。

所有 IGES 文件都包含五个重要的标识段:以 S 为标识的开始段、以 G 为标识的全局段、以 D 为标识的元素索引段、以 P 为标识的参数数据段(识别字符 P)以及以 T 为标识的结束段。接下来以某船 IGES 文件为例,对每个部分作简要介绍。

1) 开始段 (Start Section)

A simulation-based design solver OPTShip-SJTU V2.0 IGES converter	S	1
---	---	---

开始段提供有关该文件的前言信息说明,所有说明字符串位于文件的第 1~72 列,可以占若干行,不固定。说明生成该文件的求解器。

2) 全局段 (Global Section)

全局段提供了软件处理该文件所需基本信息,如该文件采用的参数分隔符、记录分隔符、文件名、创建该文件的作者、时间、单位、IGES 版本等信息。例如:



1H,,1H;,7HUnknown,7HUnknown,18HIGES converter 1.1,3H1.1,32,38,6,308,15,7G	1
HUnknown,1,2,2HMM,1,0.01,13H800101.120000,0.01,1,14HUnknown author,26HShip	2
Optimization Design from CMHL,SJTU,8,0,13H800101.120000,;	G 3

3) 元素索引段 (Direction Entry Section)

IGES 文件中一种元素采用一个索引，一个索引详细记录了相关参数信息，分别是元素类型号、参数指针（该元素的参数在接下来的参数数据段的起始行号）、IGES 版本号、线型、图层、参数记录数（该元素的参数在参数数据段的所占行数）、颜色号等共 20 项，每一项占 8 个字符，共占据两行。本章节中只关注元素类型号、参数指针、参数记录数。例如：

314	1	0	0	0	0	0	00000000D	1
3140.000000		0	1	0			colour	0D 2
128	2	0	1	0	0	0	000000001D	3
1280.000000		-1	20555	0			nurbs	0D 4
128	20557	0	1	0	0	0	000000001D	5
1280.000000		-1	7199	0			nurbs	0D 6

上例中第 3 行第 1 个数 128 指的是有理 B 样条曲面，第 2 个数代表该元素在参数数据段从第 2 行开始；第 4 行第 4 个数代表该元素在参数数据段占 20555 行；同理，第 5 行第 1 个数 128 也表示有理 B 样条曲面，第 2 个数代表该元素在参数数据段从第 20557 行开始；第 6 行第 4 个数代表该元素在参数数据段占 7199 行。因此该文件表示包含了两个 NURBS 曲面。

4) 参数数据段 (Parameter Data Section)

元素索引段中出现的所有元素，都会在参数数据段中给出对应的详细的几何数据记录，其格式不固定。实际上，IGES 文件可以涵盖所有类型和任意数量的元素，所有元素均有其独有的类型标识号。本研究中主要关注曲线和曲面的几何元素，其类型标识号的范围为 100~199，诸如 100 定义圆弧 (Circular Arc)、104 定义二次曲线 (Conic Arc)、108 定义平面 (Plane)、126 定义有理 B 样条曲线 (Rational B-Spline Curve) 以及 128 定义有理 B 样条曲面 (Rational B-Spline Surface)。

船型 IGES 读写研究是在复杂的 IGES 文件中获取船体 NURBS 曲面相关的几何数据信息（控制点坐标、节点向量、权因子），然后将这些信息作为船体变形模块以及网格生成模块的输入数据等；经过船型变换后，任一新船型都可以 IGES 格式写出并保存。因此，下面简要介绍曲面几何元素 128 所对应的参数数据段格式与含义：



128,252,75,3,3,0,0,1,0,0,	3P	2
0,0,0,0,0.011905,0.011905,0.011905,0.02381,0.02381,0.02381,	3P	3
0.035714,0.035714,0.035714,0.047619,0.047619,0.047619,0.059524,	3P	4
0.059524,0.059524,0.071429,0.071429,0.071429,0.083333,0.083333,	3P	5
0.083333,0.095238,0.095238,0.095238,0.107143,0.107143,0.107143,	3P	6
0.119048,0.119048,0.119048,0.130952,0.130952,0.130952,0.142857,	3P	7
0.142857,0.142857,0.154762,0.154762,0.154762,0.166667,0.166667,	3P	8
0.166667,0.178571,0.178571,0.178571,0.190476,0.190476,0.190476,	3P	9
0.202381,0.202381,0.202381,0.214286,0.214286,0.214286,0.22619,	3P	10

1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,	3P	1321
1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,	3P	1322
1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,	3P	1323
1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,	3P	1324
1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,	3P	1325
1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,	3P	1326
-0.464175146045,-1.188610351063E-16,-0.05256368906,	3P	1327
-0.4621961070281,-1.186186727266E-16,-0.05256368906,	3P	1328
-0.4602144881982,-1.183759944109E-16,-0.05256368906,	3P	1329
-0.4583131942997,-1.181431530622E-16,-0.05256368906,	3P	1330
-0.4564119004012,-1.179103117135E-16,-0.05256368906,	3P	1331
-0.4545909314342,-1.176873073318E-16,-0.05256368906,	3P	1332
-0.4528337635577,-1.174721163302E-16,-0.05256368906,	3P	1333
-0.4510767432804,-1.172569434044E-16,-0.05256368906,	3P	1334
-0.4493835133757,-1.170495825461E-16,-0.05256368906,	3P	1335

128 代表几何元素类型为 NURBS 曲面;252 代表 u 方向控制点数量为(252+1), 75 代表 v 方向控制点数量为 (75+1); 后面的两个 3 表示在 u 、 v 方向 B 样条基函数次数都为 3; 再后面的 5 个数 (0,0,1,0,0) 分别代表 NURBS 曲面在 u 、 v 方向不封闭、是有理 B 样条曲面、 u 、 v 方向上具有非周期性; 往后一一提供了该 NURBS 曲面 u 、 v 方向的节点向量值、权因子以及控制点的坐标值。该船型 IGES 文件读写主要处理这类的船体 NURBS 曲面信息 (128), 不需要处理其它类型, 仅需原样写出。

5) 结束段 (Terminate Section)

文件最后一行为结束段, 前四个参数 (共占 32 个字符) 分别记录了前四个段的段码和各段的总占行数, 第 33~72 个字符空白, 最后 8 个字符为结束段的段码和行数。例如:

S	1G	3D	6P	27755	T	1
---	----	----	----	-------	---	---

基于 IGES 文件构造规则, 采用 C++语言具体实现读入流程如下(漆小舟, 2018):



- 1) 首先读取结束段内容, 获得文件整体信息即各段所占行数;
- 2) 然后根据元素索引段提供的信息, 包括元素类型、其在参数数据段起始行号以及所占总行数 (见图 2-10), 读取对应参数数据段的内容并保存到 C 语言结构体中;
- 3) 循环步骤 2), 直到所有元素读取完毕。

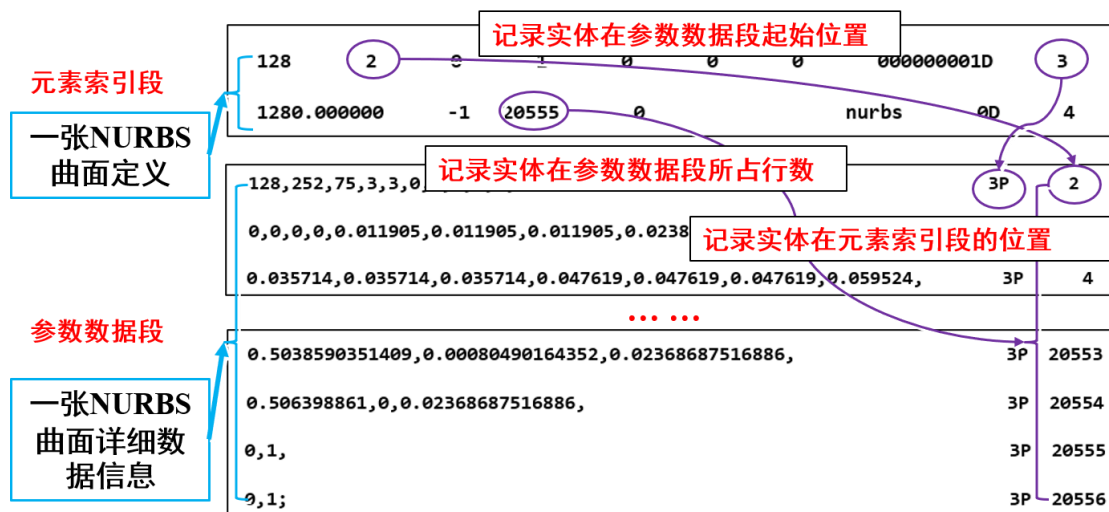


图2-10 NURBS 曲面 (128) 元素索引段与参数数据段的对应关系

Fig.2-10 Corresponding relation between the direction entry section and parameter data section for NURBS surface entry (128)

2.3 船体 NURBS 曲面的半参数化变形方法

2.3.1 平移法对船体 NURBS 曲面变形

平移法 (Shifting Method) 是一种半参数化建模方法 (吴建威, 2017)。它于 1950 年由 Lackenby 首次提出, 后经诸多学者拓展出各种形式。该方法通过改变横剖面的纵向位置来修改纵向棱形系数、浮心纵向位置以及平行中体长度。首先为了保证船长不变, 首尾垂线固定, 然后母型船的横剖面面积曲线通过修改函数 (比如样条多项式) 被修改, 最后各站的纵向位移量根据该站的横剖面面积曲线变化量而确定。水线和横剖面也因此相应获得。

为了使全船或半船实现连续协调变换, 引入修改函数 $g(x)$:

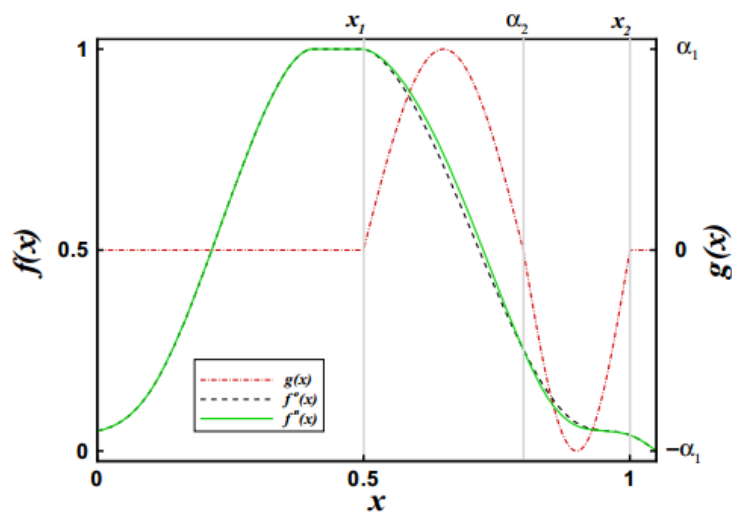


图2-11 基于平移法的横剖面面积曲线变化

Fig.2-11 Changes of sectional area curve for shifting method

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

其中, x_1 , x_2 分别表示船体曲面变形范围的起点和终点位置, α_1 表示船体变形的最大幅度, α_2 表示船体曲面变形范围内固定不变的纵向位置。

图 2-11 中, $f(x)$ 表示横剖面面积曲线函数, $f^0(x)$ 表示母型船的横剖面面积曲线 (图中黑色虚线), $f^n(x)$ 表示变形船的横剖面面积曲线 (图中绿色实线), 给定船型修改函数 $g(x)$ (图中红色虚线), 也就是给定参数 x_1 、 x_2 、 α_1 、 α_2 , 根据公式 (2-6), 输入船体曲面上的任一初始纵向位置即可求得相应的平移距离。

该方法的步骤如图 2-12 所示: 首先通过 `readIGESwriteGO` 函数解析母型船 IGES 文件, 获取船体曲面所有 NURBS 控制点的坐标, 然后读取平移法的参数字典文件: 允许变形的船体曲面范围、固定站位以及变形幅值。根据修改函数公式 (2-6) 求得各站纵向平移的距离, 获得所有 NURBS 控制点的新纵向坐标, 再通过 `readGoWriteIGES` 函数输出新船型 IGES 文件。

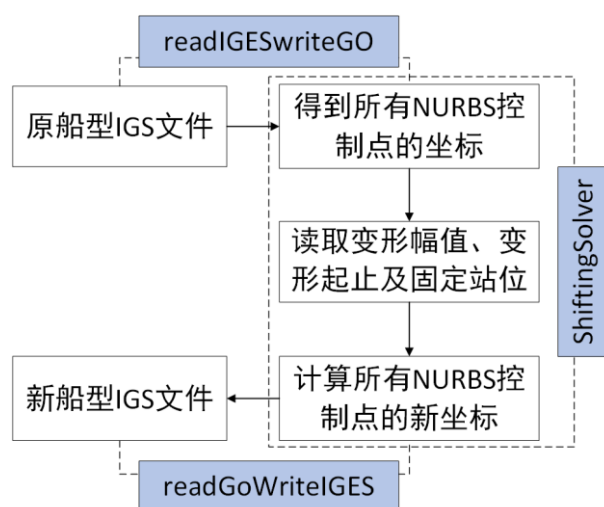


图2-12 基于 NURBS 曲面的平移法基本步骤

Fig.2-12 The basic steps of Shifting method based on the NURBS surfaces

图 2-13 是采用平移法对 Wigley 船型的前半船进行整体变形, 图中红色线为横剖线, 蓝色线为纵剖线, 绿色线为水线, 给了修改函数中 α_1 一个较大的值 $0.025L_{pp}$, 固定站位 α_2 位于 $0.24L_{pp}$, 施加变形之后根据纵剖线 (蓝色线条) 与横剖线 (红色线条) 的相对位置可以看出 Wigley 船在 $0.24L_{pp}$ 以前即首部变尖, 而在 $0.24L_{pp}$ 以后到船中位置变肥, 而船中到尾部船体曲面未发生变化。

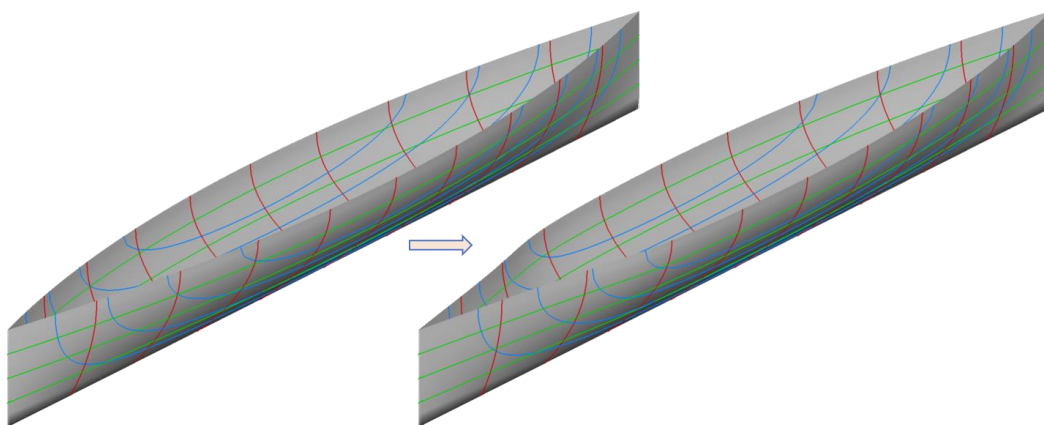


图2-13 基于平移法的 Wigley 前半船变形

Fig.2-13 Deformation of the first half of Wigley based on Shifting method

2.3.2 FFD 方法对船体 NURBS 曲面变形

自由变形方法 (FFD) 是由 Sederberg 和 Parry 于 1986 年提出的一种编辑几何形状的手段。对 FFD 方法的理解可以做一个类比: 假设一个物体被一个灵活的、可塑



的平行六面体包围，这个物体也被认为是可塑的，倘若给平行六面体施加外力使其发生形变，则这个物体也会随之发生形变。

FFD 方法并不是直接操作物体几何造型，而是将待变形的物体嵌在一个可变形的长方体中，如果长方体形状发生变化，则物体也发生形变。建立如图 2-14 所示的局部坐标系 $O'-STU$ ：

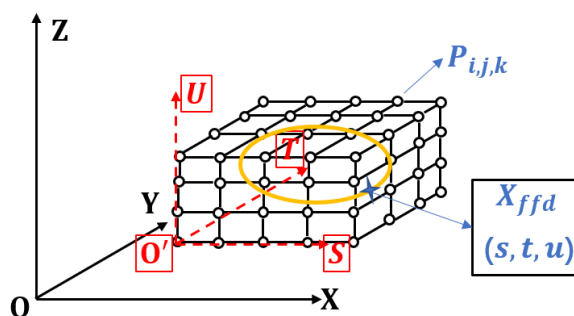


图2-14 FFD 方法中的坐标系

Fig.2-14 Coordinate systems in FFD method

其中， O' 代表局部坐标系的原点， S, T, U 表示局部坐标系下沿三个坐标轴的轴矢量。由此可知，笛卡尔坐标系 $O-XYZ$ 下的任一点 X 在局部坐标系中的坐标 (s, t, u) ，可以表达如下：

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + s\mathbf{S} + t\mathbf{T} + u\mathbf{U} \quad (2-7)$$

其中， $\mathbf{X}_0$ 为局部坐标系中的原点，任一局部坐标 (s, t, u) 可由以下方程求解：

$$s = \frac{\mathbf{T} \times \mathbf{U} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{T} \times \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}}, \quad t = \frac{\mathbf{S} \times \mathbf{U} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{S} \times \mathbf{U} \cdot \mathbf{T}}, \quad u = \frac{\mathbf{S} \times \mathbf{T} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{S} \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{U}} \quad (2-8)$$

其中， s, t, u 的取值均介于 0 和 1 之间。

在长方体上布置控制顶点 $\mathbf{P}_{i,j,k}$ ：本文采用平行于 $O'TU$, $O'SU$, $O'ST$ 面的等距截面分别沿 S, T, U 三个方向将 $O'S$, $O'T$, $O'U$ 等分，顶点数分别为 l, m, n ，则 $\mathbf{P}_{i,j,k}$ 可表示为：

$$\mathbf{P}_{i,j,k} = \mathbf{X}_0 + \frac{i}{l}\mathbf{S} + \frac{j}{m}\mathbf{T} + \frac{k}{n}\mathbf{U} \quad (2-9)$$

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

那么待变形物体上的点，甚至是长方体内任意点的笛卡尔坐标 $\mathbf{X}$ 可以用控制顶点表示为：



$$\mathbf{X}(s, t, u) = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,j}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) \mathbf{P}_{i,j,k} \quad (2-10)$$

其中，B 代表伯恩斯坦（Bernstein）多项式基函数，定义为：

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (2-11)$$

由（2-10）式可知，待变形物体上的点坐标可以表示为关于所有控制顶点位置的线性函数，由此可建立待变形物体上的几何点与长方体上的控制顶点之间的关系，改变部分控制顶点的位置，待变形物体上的几何点位置也将发生变化，从而改变物体形状。假设原来长方体内的任一点 X 的局部坐标为 (s, t, u) ，控制顶点 $\mathbf{P}_{i,j,k}$ 的位置变化后得到新的控制顶点 $\mathbf{P}'_{i,j,k}$ ，则点 X 也将移动到新位置，设为 $\mathbf{X}_{ffd}$ ：

$$\mathbf{X}_{ffd} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,j}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) \mathbf{P}'_{i,j,k} \quad (2-12)$$

改变控制顶点的可变个数、方向和距离，待变形物体可得到不同的新形状。

该方法首先通过 `readIGESwriteGO` 函数解析母型船 IGES 文件，获取船体曲面所有 NURBS 控制点的坐标，然后读取 FFD 方法的参数字典文件：FFD 控制框范围、控制点分布、可动控制点移动方向及移动量。根据公式（2-8）计算 FFD 控制点的局部坐标，根据可动 FFD 控制点的新全局位置，代入公式（2-12）求得 NURBS 控制点的新全局坐标，再通过 `readGoWriteIGES` 函数输出新船型 IGES 文件（图 2-15）。

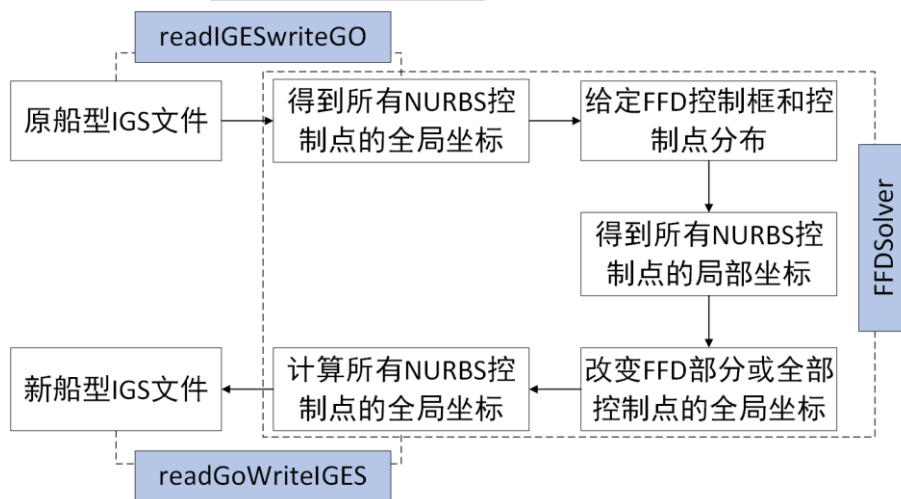


图2-15 基于 NURBS 曲面的 FFD 方法基本步骤

Fig.2-15 The basic steps of FFD method based on the NURBS surfaces

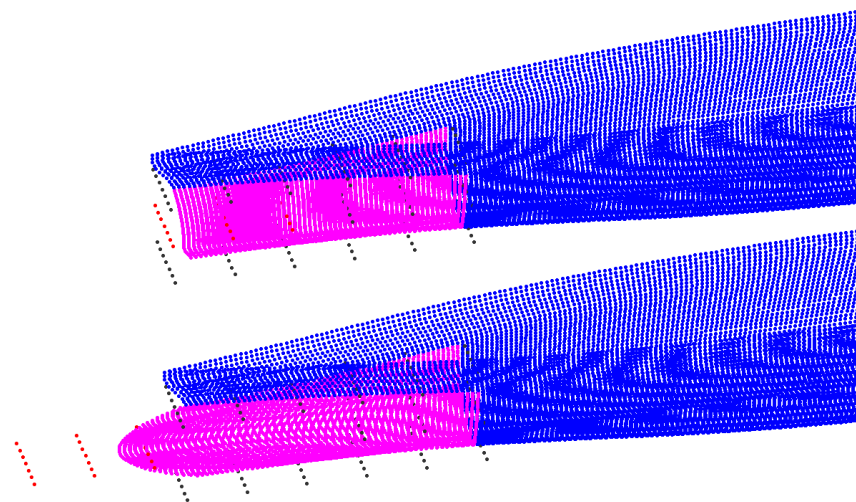


图2-16 基于 FFD 变形的船体表面 NURBS 控制点移动量和 FFD 控制节点移动量
Fig.2-16 FFD control nodes and the NURBS control points displacement of a ship hull under the FFD method, based on the NURBS geometric expression for a ship hull (upper: before deformation; lower: after deformation)

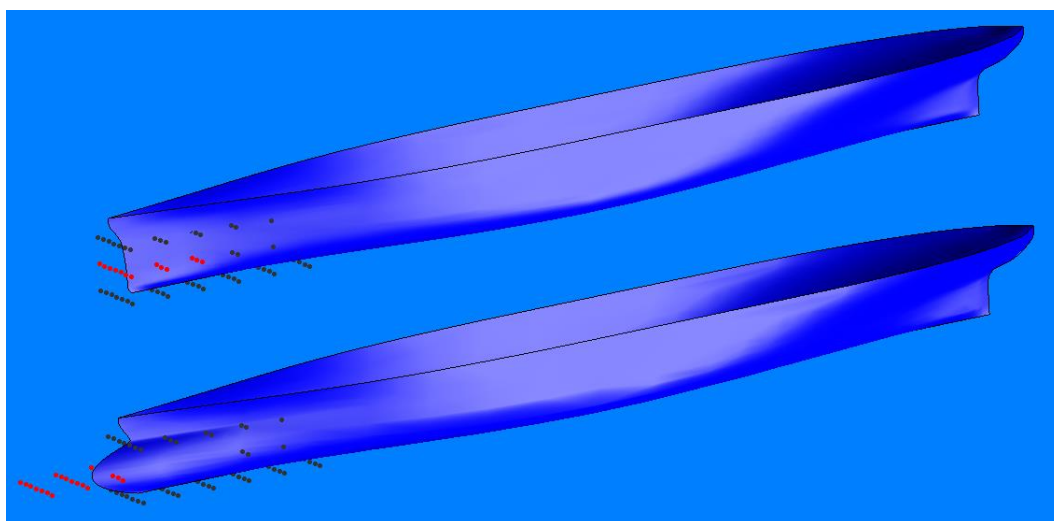


图2-17 基于 NURBS 的 FFD 船型变换应用
Fig.2-17 The application of FFD method for ship deformation

图 2-16 和图 2-17 展示的是 S60 的船体 NURBS 曲面采用 FFD 方法进行首部变形, 只改变红色的 FFD 控制点位置, 将其沿船长方向移动, 通过公式 (2-7) 计算出船体 NURBS 控制点的新位置如图 2-16 所示, 再通过 NURBS 反求曲线上的点坐标,



得到如图 2-17 所示的变形后的船型；图 2-18 是采用 FFD 方法对 KCS 的 NURBS 首部曲面进行弯曲变形，从而有效改变 KCS 球鼻艏的形状。

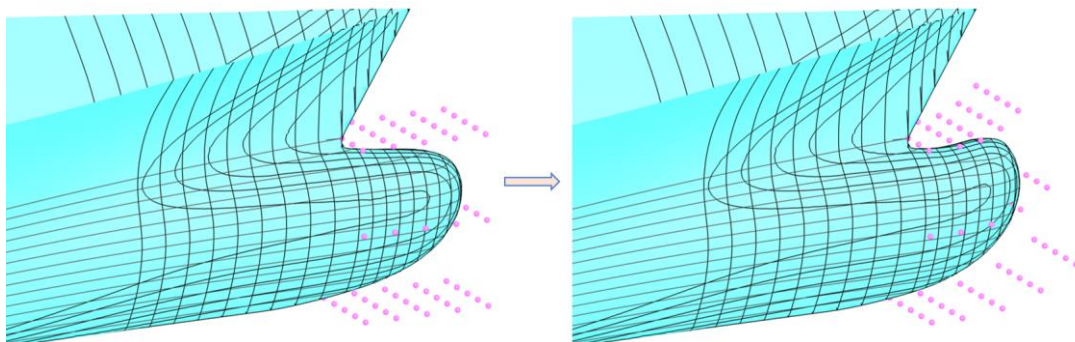


图2-18 基于 FFD 方法的 KCS 首部弯曲变形

Fig.2-18 Bending deformation of KCS bow based on FFD

2.3.3 RBF 方法对船体 NURBS 曲面变形

径向基函数方法（Radial Basis Function, RBF）是由 de Boer 等 2007 年提出的一种物体网格变形方法。径向基函数本身是一类仅依赖离中心点距离的实值函数，它沿径向对称，具体定义为空间中任意一点 $\mathbf{X}$ 到某中心点 $\mathbf{X}_i$ 之间的欧氏距离，通常可写为：

$$\phi(\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_i\|), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-13)$$

在对船体曲面做变换时，取插值函数为：

$$s(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_j\|) + p(\mathbf{X}) \quad (2-14)$$

其中， $s(\mathbf{X})$ 是位移函数，表示船体表面上控制点 $\mathbf{X}$ 的移动距离，由两部分之和求得： N 个径向基函数之和与一个多项式函数； N 是控制点的个数； $\mathbf{X}_j = (x_j, y_j, z_j)$ 为每个径向基函数的中心，就是 N 个控制点的三维坐标；基函数 ϕ 是空间中一点 $\mathbf{X}$ 与中心 $\mathbf{X}_j$ 的欧氏距离的函数。

有多种基函数适用于多变量的数据插值，本研究选取一种紧支撑径向基函数（Compact Support Radial Basis Function, CSRBF）（漆小舟，2018），Wendland 基函数的三维形式：



$$\phi(\|X\|) = \begin{cases} (1-\|X\|)^4 (4\|X\|+1) & 0 \leq \|X\| \leq 1 \\ 0 & \|X\| > 1 \end{cases} \quad (2-15)$$

P 表示仿射变换的低阶多项式，本文中的 p 可表示为：

$$p(\mathbf{X}) = c_1 + c_2x + c_3y + c_4z \quad (2-16)$$

由控制点的位移可知，系数 λ_j 和 p 根据插值条件确定：

$$s(X_j) = f_j, \quad j=1,2,\dots,N \quad (2-17)$$

其中， f_j 包含边界控制点的位移量；为了求解插值函数中的未知系数，还需引入新的附件条件：权重系数应该满足使能量方程取得最小化所需的正交约束条件：

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j = \sum_{j=1}^N \lambda_j x_j = \sum_{j=1}^N \lambda_j y_j = \sum_{j=1}^N \lambda_j z_j = 0 \quad (2-18)$$

即得到

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j p(X_j) = 0, \quad j=1,2,\dots,N \quad (2-19)$$

综合为如下矩阵形式：

$$\begin{pmatrix} f \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{q} \\ \mathbf{q}^T & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ c \end{pmatrix} \quad (2-20)$$

其中有：

$$\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]^T \quad (2-21)$$

$$\mathbf{c} = [c_1, c_2, c_3, c_4]^T \quad (2-22)$$

$$\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3, f_4]^T \quad (2-23)$$

$$M_{i,j} = \phi(\|X_i - X_j\|), \quad i, j=1,2,\dots,n \quad (2-24)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ z_1 & z_2 & \dots & z_n \end{bmatrix}^T \quad (2-25)$$



求解公式 (2-20)，得到插值函数中的各个系数，将待变形表面其他点坐标代入该插值函数，即可得到所有点的相应位移情况，再重新定位所有点，可得到变形后的船体曲面形状。

在船型变换模块中实现并运用该方法时，首先将船体曲面上所有的点划分为三类：

- 1) 固定控制点：固定不动的节点，一般对船体的特征线，如设计水线，中纵剖线，中横剖线上布置此类控制点，以此固定船体特征线；
- 2) 移动控制点：可定义沿不同方向移动的节点，作为优化设计参数；
- 3) 随动控制点：随移动控制点的移动而移动的其他节点。

然后根据 RBF 理论完成船体变形。RBF 方法将上述移动控制点的位移量作为优化设计变量，通过基于径向基函数的插值方法求解其他随动控制点的位移。

如图 2-19 所示，该方法首先通过 `readIGESwriteGO` 函数解析母型船 IGES 文件，获取船体曲面所有 NURBS 控制点的坐标，然后读取 RBF 方法的参数字典文件：RBF 可动、随动及固定控制点、可动控制点移动方向及位移量。求解公式 (2-20) 得到插值系数，根据公式 (2-14) 计算所有 NURBS 控制点的移动位移，从而得到 NURBS 控制点的新坐标位置，再通过 `readGoWriteIGES` 函数输出新船型 IGES 文件。

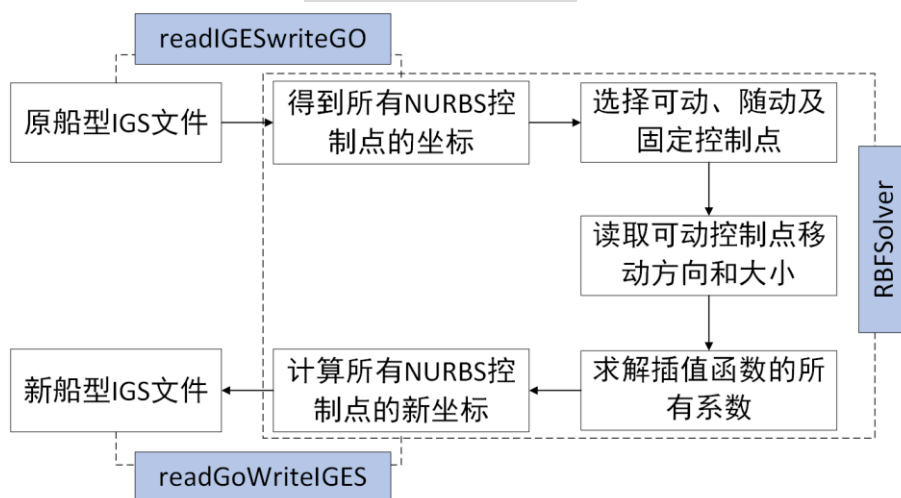


图2-19 基于 NURBS 曲面的 RBF 方法基本步骤

Fig.2-19 The basic steps of RBF method based on the NURBS surfaces

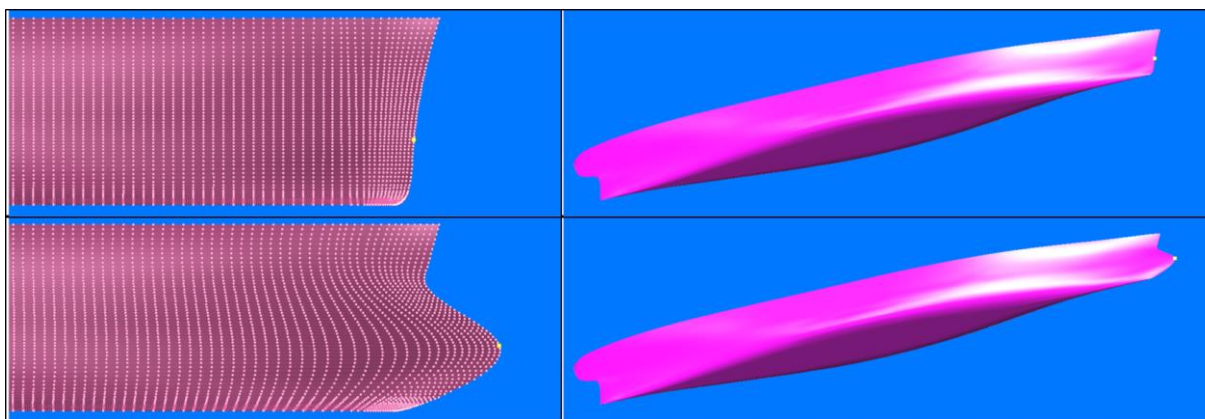


图2-20 基于 NURBS 的 RBF 船型变换应用

Fig.2-20 The application of RBF method for ship deformation

图 2-20 展示了 S60 船体 NURBS 曲面的 RBF 船型变换应用，只采用了一个可动控制点（黄色点），使其朝船长方向移动，进而改变船首形状。图左边展示的是船体 NURBS 控制点移动情况，图右边对应船体曲面变形情况，可见船体光顺性极好，此外，这里仅将一个点作为可动点，并且朝着一个方向移动，可以想象不同的移动距离可以得到具有不同大小的球首的变形船，且这样的变形可以很大。

2.4 船体 NURBS 曲面网格快速生成方法

2.4.1 网格生成方法

目前，曲面网格划分技术已经有很多成熟的方法：引导线波前法、Delaunay 法、映射法、均匀布点与细分网格法等。本文采用简单的映射法，其基本思想：物体曲面 → 参数平面网格化 → 空间曲面网格生成。详细地，我们将物体曲面先用平面参数化形式来表示，若把参数空间 U 、 V 方向进行等间距或者不等间距划分，得到系列参数空间点 (u, v) ，然后再通过 NURBS 曲面求值反求曲线上的点的三维坐标 (x, y, z) ，即网格点，从而得到曲面的网格。

$$\begin{cases} x = x(u, v) \\ y = y(u, v) \\ z = z(u, v) \end{cases} \quad (2-26)$$

因此，映射法就是将三维表面上的网格生成降维到二维参数空间生成平面网格，得到参数坐标 (u, v) 和单元反映射到三维空间曲面得到表面上的网格点的三维坐标，进而得到表面的网格划分（见图 2-21）。

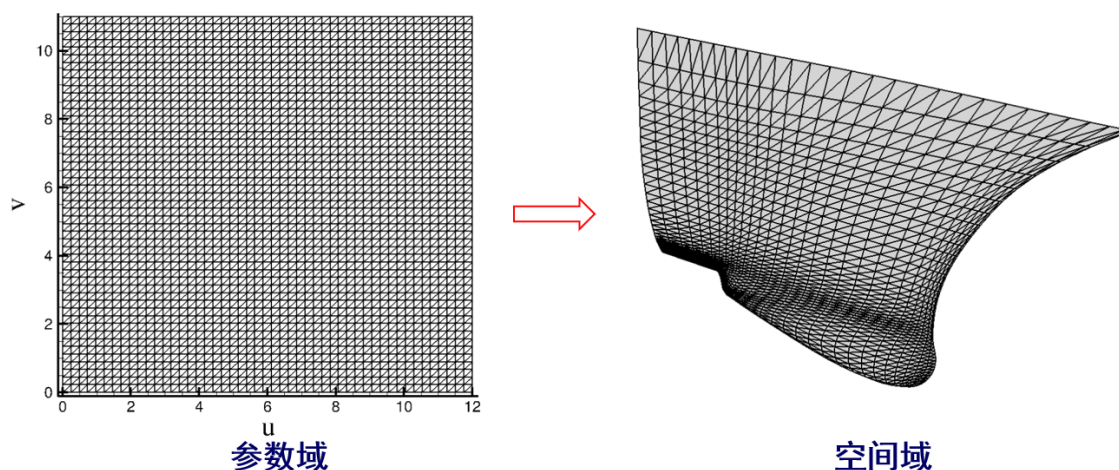
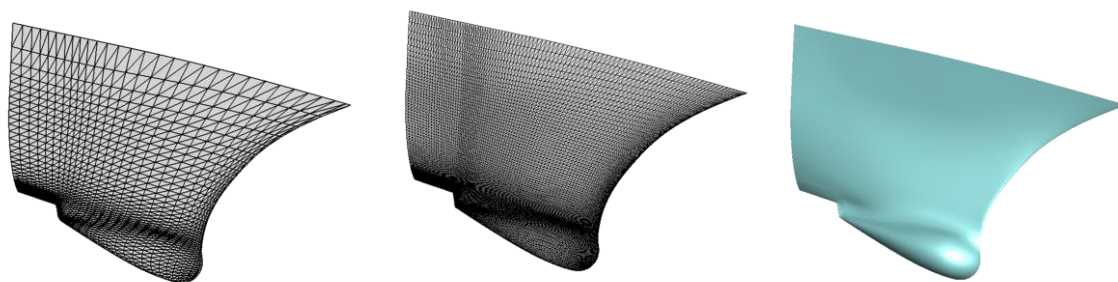


图2-21 映射法网格生成示意图

Fig.2-21 Schematic diagram of mesh generation based on the mapping method

该方法实现简单，且可以根据需要通过减小参数空间 U 、 V 方向的划分间距进行网格加密。如图 2-22 采用映射法对 DTMB 5415 首部进行网格划分，通过减小参数域的划分间距从而加密网格，当隐藏网格点可以看出船体网格曲面非常光滑。这保证了后续进行计算域网格划分时船体曲面的精准捕捉。值得注意的是这并不会增加后续数值计算的网格量，因为本文都是采用粘流方法进行三维数值计算，需要的是三维计算域的网格。



U,V 方向网格点数: 30×40 U,V 方向网格点数: 100×100 网格曲面 (关闭网格点)

图2-22 映射法网格加密示意图

Fig.2-22 Schematic diagram of mesh refined based on the mapping method

在应用映射法进行网格划分时，如果船体 NURBS 曲面由四条线围成，则要求对边采用相同的间距数，如果船体 NURBS 曲面由三条线围成，则三条边都采用相同的间距数划分。



2.4.2 网格文件格式

求解器 OPTShip-SJTU 2.0 中船体 NURBS 曲面网格生成后提供两种网格文件格式输出：一种是 UCD 格式，可用于势流计算；一种是 STL 格式，可用于粘流计算。

1) .ucd 网格文件格式

UCD 是 Unstructured Cell Data 简称，是一种非结构化网格单位数据结构，由 AVS/Express 软件支持的非压缩的 ASCII 文件格式，目前也可用二进制表示，可以包含颜色信息。该文件的扩展名“.ucd”。

文件中可以用“#”注释，但只能存在文件的开始。

文件分为三部分：

第一部分占一行包含五个值：节点数、单元数、每个节点数据项的数目、每个单元数据项的数目、模型数（后三项在本文应用中都可以是 0，无需改动）；

第二部分列举所有节点，每一行写着一个节点的编号以及坐标值（X,Y,Z）；

第三部分列举所有单元，每一行写着一个单元的编号、单元材料（一般写作 0）、单元类型（如三角形，四边形等）以及构成该单元的节点编号。

```
# solid ascii io exported from OPTShip-SJTU 2.0
72197 144390 0 0 0
1 -0.4644285559539301 0.04908898234263444 0.05017637205008573
2 -0.4615245308194912 0.0501799176368345 0.05144177396658837
3 -0.4804908710326093 0.0004025276363626829 -0.05095198052005438
4 -0.4780621236873855 0.0004216798349849997 -0.0532
5 0.5150973798447765 0.00111960788246592 0.05163512058020616
...
1 0 tri 1 2 51862
2 0 tri 3 25420 4
3 0 tri 51503 51533 5
4 0 tri 6 7 8
5 0 tri 25376 9 10
...
```

2) .stl 网格文件格式

STL 文件代表“stereolithography”，表示这个文件格式的初始目的是描述三维静态物体的形状；它只用于表示三角形网格。Stl 文件同样支持两种格式：一种是二进制格式，另一种是美国信息交换标准代码（ASCII）格式。本文都是采用 ASCII 格式表示。

ASCII 代码格式的 STL 文件按行逐次给出了三角网格单元的形状信息，每一行开始是 1 个或 2 个关键字信息。



在 STL 文件中信息单元 facet 代表一个带矢量方向的三角网格单元，所有这样的三角网格单元整合构成了 STL 三维模型。

整个 STL 文件以“solid”标记开始记录，首行可包含实体的名字、生成的软件、路径等，并且“endsolid”标记结束。

每一个三角网格单元以“facet”标记记录，并以“endfacet”标记结束，每一个 facet 的数据信息占 7 行；

outer loop 关键字随后一行给出三角网格单元的 3 个顶点坐标，占 3 行，并以“vertex”标记记录，三个顶点按沿指向实体外部的法向逆时针写出，各占一行；

facet normal 给出三角网格单元指向实体外部的法向量坐标；

```
solid ascii io exported from OPTShip-SJTU 2.0
facet normal 1.261762529e-16 1 1.193109125e-17
  outer loop
    vertex 0.0167375 5.920054568e-17 -0.0524895
    vertex 0.01527859443 5.936024077e-17 -0.05065499974
    vertex 0.01767733079 -9.180112033e-05 -0.05066389434
  endloop
endfacet
facet normal 0.03825282555 0.9988172932 0.03001226757
  outer loop
    vertex 0.0167375 5.920054568e-17 -0.0524895
    vertex 0.01767733079 -9.180112033e-05 -0.05066389434
    vertex 0.01913675505 5.889961778e-17 -0.0524895
  endloop
endfacet
facet normal 0.07412797549 0.9961625473 0.04653195168
  outer loop
    vertex 0.01527859443 5.936024077e-17 -0.05065499974
    vertex 0.01393378851 5.950301095e-17 -0.04878128131
    vertex 0.01633174425 -0.000178010449 -0.04879825287
  endloop
endfacet
... ..
endsolid ascii io exported from OPTShip-SJTU 2.0
```

通过映射法得到的网格可以表示成.ucd 格式，从而可以直接作为势流求解器 NMSHIP-SJTU 的船体网格输入文件；也可以表示成.stl 格式，从而可以直接作为 OpenFOAM 自带体网格划分求解器 snappyHexMesh 的船体网格输入文件，自动生成计算域网格进而采用粘流求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行 CFD 数值求解。图 2-23 及图 2-24 表示的是通过映射法自动生成变形前后船体曲面的网格，可以看出船体网格质量较高。

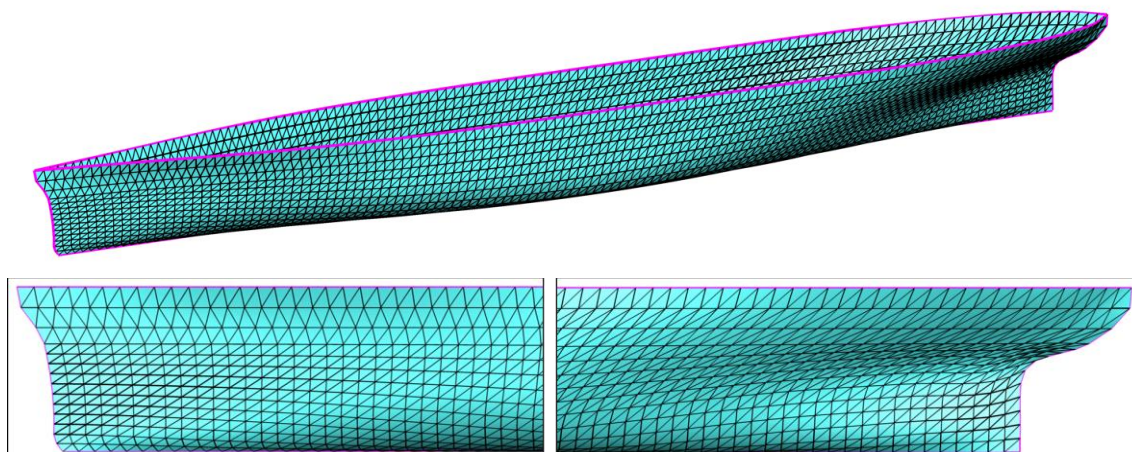


图2-23 S60 母型船网格

Fig.2-23 Mesh for S60 initial hull

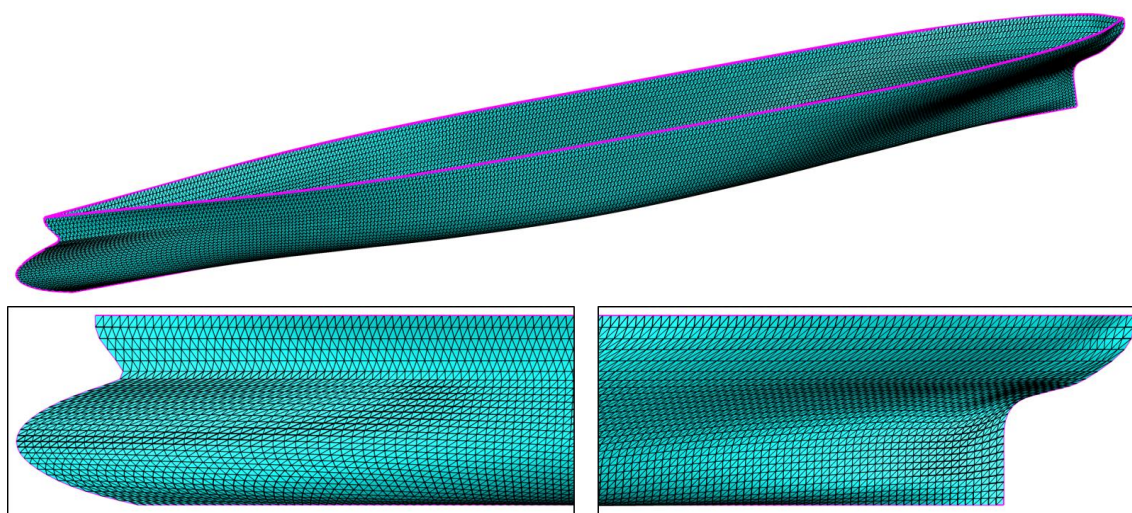


图2-24 S60 变形后网格生成

Fig.2-24 Mesh for S60 modified hull

2.5 本章小结

本章节首先评述了目前船型表达及变形方法，为了弥补其存在的不足之处，提出采用基于船体 NURBS 曲面的半参数化变形方法；然后介绍了平移法、自由变形方法和 RBF 方法对船体 NURBS 曲面变形的基本原理、具体实施步骤及应用实例；最后给出了船体 NURBS 曲面的网格快速生成方法，采用映射法自动生成变形后船体曲面高质量网格。





第三章 船舶目标性能近似模型构建及优化求解方法研究

3.1 船型优化设计中的数值计算量巨大问题

在船型优化设计问题中，优化时长和计算资源主要耗费在大量的数值计算环节。

一方面，相对于势流方法，耗时较长的粘流理论（或称粘性 CFD 方法）的应用需求越来越大。首先，船型优化设计不再仅仅关注全局的水动力性能（快速性、耐波性以及操纵性），有时甚至需要针对局部的流场特性（比如首部垂向加速度、尾部伴流均匀程度以及某点的动压力值等）进行优化，其次，针对某些船型的优化，比如低速肥大型船的阻力优化必须考虑粘性影响，多体船的优化必须考虑片体干扰影响，基于这两点，采用势流方法可能就无法准确评估目标性能，因此有必要采用高精度的粘性 CFD 方法去评价目标性能。而粘性 CFD 数值模拟较势流数值计算又需要相对较长的计算时间和相对较大的计算资源。比如，采用势流方法去评估一条船在设计航速下航行所受的静水阻力值可能直接在个人计算机上一分钟不到就完成，而采用粘性 CFD 数值模拟则需要几个小时，精度要求高的话需要采用较密的网格进行计算，则可能需要更长时间，比如十几个小时才能完成。

另一方面，在船型优化设计领域，目标性能与船型变形参数之间没有明确的函数关系，因此随着设计参数、几何约束以及需要考虑的水动力性能指标的增加，优化迭代过程中需要直接调用高精度粘性 CFD 数值计算的次数呈非线性增长，甚至指数增长。此外，船型优化设计对目标性能评估的精度也有要求，必须具有清晰地“分辨率”，换句话说，就是船型稍微改变，其目标性能必须被精确评估，误差尽可能小，否则可能由于数值误差的存在无法评判或者误判变换后的船型目标性能是否改变。即便是借助高性能计算机进行并行计算，要想使得基于粘流理论的船型优化设计方法广泛应用于实际工程还存在一定的距离。

目前已有不少学者采用近似技术或者高效的优化算法用来解决优化时间长和计算资源耗费巨大的问题。近似技术的基本思路就是通过合理地科学地在设计空间选择有限个样本船型，然后对这些样本船型进行粘性 CFD 数值模拟得到对应的目标



性能，然后通过数学方法构建船型变形参数与目标性能的近似关系，称之为近似模型，然后在进行优化迭代的过程中，采用近似模型评估每一个新船型的目标性能。这样大大地降低了优化时长。高效的优化算法是指能够更快地收敛于全局最优解的优化算法，比如有些优化算法同时具有全局搜索能力和局部搜索能力，又或者针对随机搜索优化算法对其初始种群进行优化设计等等。下面介绍本文所采用的船舶目标性能近似模型构建方法以及优化求解的算法。

3.2 船舶目标性能近似模型构建方法

船舶目标性能近似模型的构建首先需要在变形空间（或称之为设计空间）内进行采样，即选择有限个样本船型，然后将这些样本船型进行粘性 CFD 数值模拟，得到所有样本船型的目标性能，从而形成已知的数据库：包含变形参数（自变量 X ）以及对应的目标性能（应变变量 Y ）。有了这个数据库接下来就是对这些数据进行分析，采用某种数学方法构建近似关系 $Y \sim f(X)$ 。在优化过程中可以直接调用这个近似关系去评价目标性能，并且采用近似模型的方法也能避免设计空间的数值噪声。

3.2.1 采样方法

选择合理地采样方法也是降低仿真计算的成本和时间的一大关键。试验设计（Design of Experiment, DOE），又被称为实验设计。它是数理统计的一个分支。它的内容之一就是专门讨论怎样合理地采样。DOE 的思想最早是由 R.A. Fisher 在 20 世纪 20 年代提出，用于研究雨水、浇灌水以及日照等情况对农作物产量的影响。20 世纪 40 年代，日本科学家 Taguchi 博士经过深入研究，将 DOE 技术应用于制造业，帮助获得低成本、高质量的产品。它的主要思想是通过人为地安排合适的实验方案来更加有利地对实验结果进行有效分析。

试验设计方法有很多，例如全因子设计（Full Factorial Design）、正交试验设计（Orthogonal Arrays）、中心复合试验设计（Central Composite Design）、拉丁超立方采样方法（Latin Hypercube Sampling, LHS）、优化拉丁超立方采样方法（Optimal Latin Hypercube Sampling, OLHS）以及 Sobol 采样。本章节主要介绍优化拉丁方方法及 Sobol 采样的研究与实现。

试验设计方法中有几个基本的术语：

- 1) 因子（Factors）：指的是系统的输入变量，在船型优化问题中指的是由船型变形参数组建的设计变量；



- 2) 水平 (Levels): 指的是试验设计中对因子的不同取值;
- 3) 响应 (Response): 指的是系统的输出变量, 在船型优化问题中指的是目标函数(关注的目标水动力性能)或几何约束(限制的排水量或者湿表面积等)的取值。

3.2.1.1 优化拉丁超立方采样方法

拉丁方试验设计是 1979 年 McKay 提出, 是一种“充满设计空间”的重要采样方法。拉丁方试验设计按水平列成一个随机矩阵, 叫做拉丁方矩阵, 在同一列中所有因子的水平都不重复。详细地, 假设一个试验设计有 d 个试验因子, p 个采样点, 我们将它写成一个 $p \times d$ 的矩阵 $\mathbf{X}=[\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2 \dots \mathbf{x}_p]^T$, 矩阵中每一列代表一个因子, 而每一行 $\mathbf{x}_i=[x_i^{(1)} x_i^{(2)} \dots x_i^{(d)}]$ 代表一个样本点。将每一个试验因子分成 p 个水平并且每一个水平上仅有一个样本点。

拉丁超立方采样的基本步骤是:

- (A) 将所有因子分成互不重叠的 p 个区间, 并保证每个区间等概率采样 (通常使得区间长度相同, 因此采用一个均匀分布);
- (B) 在所有因子的所有区间中随机地选择一个样本点, 则所有因子都有 p 个取值;
- (C) 再从所有因子随机抽出 (B) 中选择的采样点, 将它们构造成向量 $\mathbf{x}_i$ 。总共选择 p 次组成 p 个向量组成 $\mathbf{X}=[\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2 \dots \mathbf{x}_p]^T$ 。

上述是最基本的拉丁超立方采样, 也称之为随机拉丁方试验设计, 其每次产生新的样本点没有考虑先前产生的样本点并且不需要事先考虑总共需要生成多少样本点数。因此它有时可能产生很差的样本点分布 (图 3-1 (b)), 稳定性差。

针对随机拉丁方采样的不稳定性缺点, 发展了中心化 LHS、对称 LHS、列正交 LHS 等改进方法, 它们都是就其中某一衡量法则进行地改进。以下介绍本文 OLHS 方法中采用的两个改进准则。

1) 最大列相关系数 $\rho_{\max}$

根据 Tang 的文章, 矩阵 $\mathbf{X}=[\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2 \dots \mathbf{x}_p]^T$ 列相关性的设计与得到的样本点之间非正交性密切相关, 因此, Cippa 通过最大化该矩阵的绝对两两列相关性, 最终得到的拉丁方矩阵正交或近正交。矩阵 $\mathbf{X}$ 任两列 X^i 和 X^j 的相关性可按照以下公式简单计算:



$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{b=1}^n [(x_b^i - \bar{x}^i)(x_b^j - \bar{x}^j)]}{\sqrt{\sum_{b=1}^n (x_b^i - \bar{x}^i)^2 \sum_{b=1}^n (x_b^j - \bar{x}^j)^2}} \quad (3-1)$$

最大绝对列相关系数 $\rho_{\max} = \max_{i \neq j} \{|\rho_{ij}|\}$ ，简记为最大列相关系数，代表最极端的两两相关性，能够反应样本点矩阵 $\mathbf{X}$ 的非正交性，则优化该最大绝对列相关系数可以控制样本点矩阵的两两列相关性。

2) 最大化最小距离准则 ϕ_p

假设 $d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 表示两个样本点之间的距离：

$$d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = d_{ij} = \left[\sum_{k=1}^m |x_i^{(k)} - x_j^{(k)}|^t \right]^{1/t} \quad (3-2)$$

其中， $t=1$ 或 2 。针对同一实验设计方案，计算任意两样本点之间的距离，将这些距离进行排序，得到距离函数取值列表 $(d_1, d_2, \dots, d_t)$ 和对应的索引列表 $(J_1, J_2, \dots, J_t)$ ， d_i 指的是不同的距离值，而 J_i 代表距离满足 d_i 的点对的个数， s 是不同距离值的个数，则最小距离准则 ϕ_p 定义为：

$$\phi_p = \min \left[\sum_{i=1}^s J_i d_i^{-p} \right]^{1/p} \quad (3-3)$$

其中， p 是一个正整数。本研究中取 2 。

该准则反映了样本的均匀性，最大化 ϕ_p 保证样本点在设计空间中的均匀分布，试验因子的每个水平都被选择，并且选择次数相等。

优化拉丁方试验设计方法 (OLHS) 采用正交性较好的初始样本点集，通过最小化 $\rho_{\max}$ 和最大化 ϕ_p 改善拉丁方矩阵的正交性和均匀性，因此 OLHS 分两步：初始样本点集的确定和拉丁方矩阵的优化过程。这些水平随机组合以生成随机拉丁超立方体作为具有 p 个点的初始 DOE 设计矩阵（因子的每个水平仅抽样一次）。对该初始随机设计矩阵进行优化：通过在矩阵的列中交换两个因子水平的顺序，生成新的矩阵并且评估最大列相关系数以及最小距离准则。此优化过程的目标是设计一个矩阵，保证样本点在设计空间的每个因子内尽可能均匀地分布。

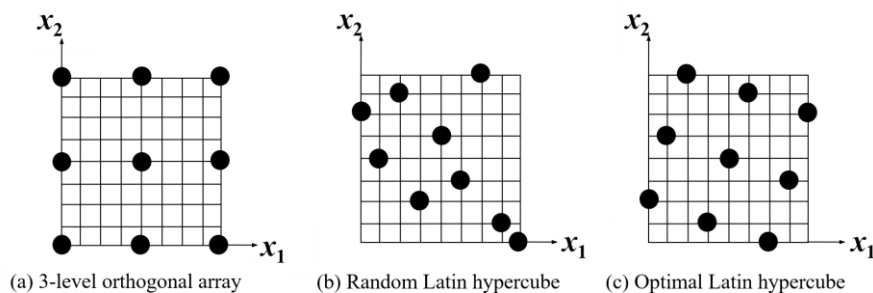


图3-1 拉丁方方法示意图（吴建威，2017）

Fig.3-1 Sketch of Latin Hypercube method

图 3-1 表示两因子九水平的试验设计（吴建威，2017）。图（a）显示的是一个标准的三水平正交阵列。虽然这个矩阵有 9 个设计点，但是每个因子只采样到了三个水平；图（b）示意的是随机拉丁超立方设计，两个因子，9 个设计点，尽管两个因子都考虑到了九个水平，但是在图（b）中的样本点分布不均匀，集中在设计空间的左上和右下角；图（c）示意的是优化拉丁方设计，两个因子，9 个设计点，并且两个因子都被考虑到 9 个水平，设计点实现了均匀分布。因此，OLHS 方法具有巨大优势。

OLHS 方法也存在局限：实验者必须事先确定样本点数。如果一次性得到的样本点数不足以构建满足精度的近似模型则需要重新再确定样本点数进行全部重新采样。一般地，根据文献（Jones, et al, 1998），采样点数 $p \geq 10d$ 。

3.2.1.2 Sobol 采样方法

Sobol 序列最早是由俄罗斯数学家 Ilya M. Sobol 在 1967 年提出来的采样方法。它的每一个因子都是由底数为 2 的 radical inversion 构成，而每一个因子的 radical inversion 采用互不相同的生成矩阵 C 。

$$X_i := (\Phi_{2,C_1}(i), \dots, \Phi_{2,C_n}(i)) \quad (3-4)$$

首先来介绍下其中重要的 radical inversion 算法。

$$i = \sum_{l=0}^{M-1} a_l(i) b^l \quad (3-5)$$

$$\Phi_{b,C}(i) = (b^{-1} \dots b^{-M}) [C(a_0(i) \dots a_{M-1}(i))^T] \quad (3-6)$$

其中， b 是一个正整数，则将一个整数 i 先表示成 b 进制的数，然后把得到的数中的所有位上的数字 $a_l(i)$ 排列形成一个向量，再将它和一个生成矩阵（generator matrix）



C 相乘得到一个新的向量,最后把这个新向量镜像到小数点右边去,就能得到一个范围在 $[0,1)$ 的数字,这就是以 b 为底数,以 C 为生成矩阵的 radical inversion 运算,记作 $\Phi_{b,C}(i)$ 。

在实际程序实现时,考虑到每一个因子都是以 2 为底数,则直接使用 bit 位操作实现 radical inversion 运算,从而使得 Sobol 序列的生成相当高效。Sobol 序列的分布非常均匀,当所需样本点数为 2 的整数次幂时,在 $[0,1)^s$ 区间中以 2 为底的每个单元间距中有且只有一个点,生成的样本质量较好(见图 3-2),此外它的另一个优势就是不需要预先确定样本的数量或者将样本储存起来,理论上可以根据需要生成无限个样本,非常适合渐进(或动态)采样。这些性质使得 Sobol 采样在很多高维空间采样需求方面被广泛应用,比如图形,渲染以及金融领域。

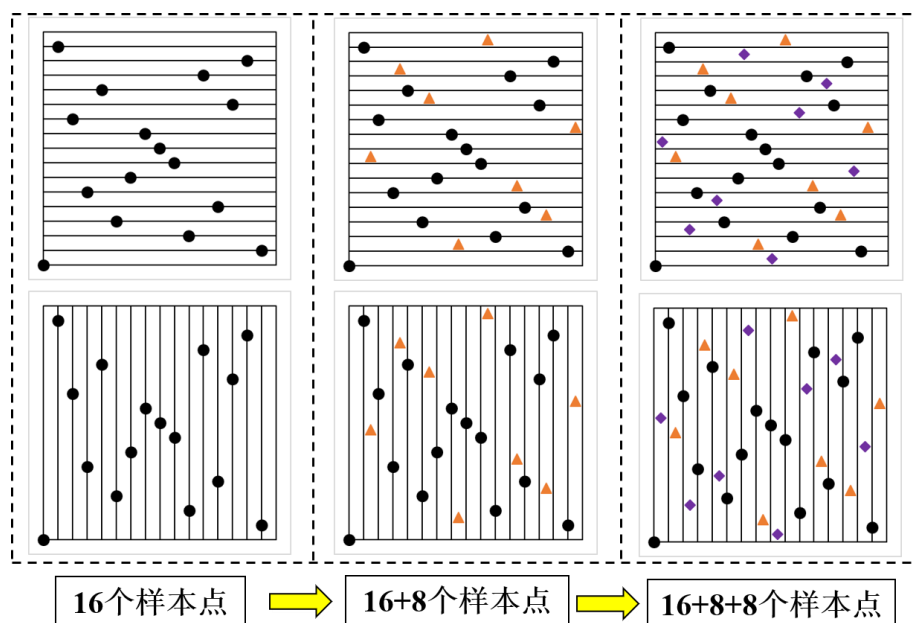


图3-2 Sobol 方法渐进采样

Fig.3-2 Progressive sampling by Sobol method

从基本理论我们可知 Sobol 序列产生涉及到一个生成矩阵 C ,而且所有维度都以 2 为底。为了搜索出如此高质量分布的生成矩阵 C , Quasi Monte Carlo 的学者们已经花了相当长时间成功研究到这种矩阵,本文是在这个网页(<https://web.maths.unsw.edu.au/~fkuo/sobol/>)下载可以生成 21201 维度的 Sobol 序列的矩阵,并作为程序默认输入文件。



3.2.2 Kriging 近似模型

当完成样本船型的选择后,就要探讨如何构建船舶目标性能与变形参数之间的近似关系,即构建船舶目标性能的近似模型。给定一组变形参数,即给定了一条新船型,能够通过该近似模型精确预报该船的目标性能。本文选择 Kriging 方法来实现船舶目标性能的近似模型构建。

Kriging 方法由南非的 D.G.Krige 于 1951 年首先提出,原来主要用于矿产储量的估算,是地质统计学的主要内容之一。从统计学上说,Kriging 方法是基于变量相关性和变异性发展的,在有限空间区域内对区域化变量值求无偏、最优估计的;而从插值角度来说,该方法是对空间分布的实验数据进行线性最优、无偏内插估计。

3.2.2.1 基本原理

采用 Kriging 方法构建近似模型可以看成是一种随机过程,表达如下:

$$y(\mathbf{x}^{(i)}) = \mu + \varepsilon(\mathbf{x}^{(i)}) \quad (i=1, \dots, n) \quad (3-7)$$

其中, μ 是随机过程的均值, $\varepsilon(\mathbf{x}^{(i)})$ 认为是对局部偏差的近似,认为是一个随机变量,服从正态分布 $(0, \sigma^2)$, 协方差不为 0。偏差的相关性可以表示如下:

$$\text{Cov}[\varepsilon(\mathbf{x}^{(i)}), \varepsilon(\mathbf{x}^{(j)})] = \sigma^2 \mathbf{R}[\text{Corr}[\varepsilon(\mathbf{x}^{(i)}), \varepsilon(\mathbf{x}^{(j)})]] \quad (3-8)$$

$$\text{Corr}[\varepsilon(\mathbf{x}^{(i)}), \varepsilon(\mathbf{x}^{(j)})] = \exp[-d(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})] \quad (3-9)$$

$$d(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)}) = \sum_{h=1}^k \theta_h |x_h^{(i)} - x_h^{(j)}|^{p_h} \quad (\theta_h \geq 0, p_h \in [1, 2]) \quad (3-10)$$

其中, $\mathbf{R}$ 表示 $n \times n$ 维矩阵, 其中第 (i, j) 元素是 $\text{Corr}[\varepsilon(\mathbf{x}^{(i)}), \varepsilon(\mathbf{x}^{(j)})]$; 参数 μ 和 σ^2 的估计没有直接的求解方法, 他们必须结合相关性参数 (θ_h 和 p_h) 的估值。

所以, 这其中就有 $(2k+2)$ 个未知参数: $\mu, \sigma^2, \theta_1, \dots, \theta_k$ 和 $p_1, \dots, p_k$. 我们可以最大化样本点的似然函数来得到他们的预测值。 $\mathbf{y} = (y^{(1)}, \dots, y^{(n)})'$ 表示由系列观测值或者数值准确值组成的 n 维向量; $\mathbf{I}$ 表示 n 维单位向量; 那么似然函数表示如下:

$$\frac{1}{(2\pi)^{n/2} (\sigma^2)^{n/2} |\mathbf{R}|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{(\mathbf{y} - \mathbf{I}\mu)' \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{I}\mu)}{2\sigma^2} \right] \quad (3-11)$$

指定相关性参数 θ_h 和 p_h ($h=1, \dots, k$), 我们可以最大化似然函数求解出 μ 和 σ^2 的值:

$$\hat{\mu} = \frac{\mathbf{I}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y}}{\mathbf{I}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{I}} \quad (3-12)$$



$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\mu})' \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\mu})}{n} \quad (3-13)$$

对于任意预测点 $\mathbf{x}^*$, 由 $\mathbf{r}$ 表示预测点误差项与所有样本点的误差项的 n 维相关性向量: $r_i(\mathbf{x}^*) = \text{Corr}[\varepsilon(\mathbf{x}^*), \varepsilon(\mathbf{x}^{(i)})]$, 由公式 (3-10) 和 (3-11) 求解。由此, 可以预测 $\mathbf{x}^*$ 点的响应值以及方差:

$$\hat{y}(\mathbf{x}^*) = \hat{\mu} + \mathbf{r}' \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\mu}) \quad (3-14)$$

$$s^2(\mathbf{x}^*) = \sigma^2 \left[1 - \mathbf{r}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} + \frac{(1 - \mathbf{I}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r})^2}{\mathbf{I}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{I}} \right] \quad (3-15)$$

公式 (3-15) 中 $-\mathbf{r}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}$ 代表由 $\mathbf{x}^*$ 和样本点的相关性带来的预测误差的减小量。如果没有相关性, $\mathbf{r} = \mathbf{0}$, 那么这项也为 0。 $(1 - \mathbf{I}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r})^2 / \mathbf{I}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{I}$ 反映了由于我们不能准确知道 μ 值, 但却需要根据样本点给出估计值使用带来的不确定性。

Kriging 模型具有较好的适应性, 可以广泛用于对低阶和高阶非线性问题的拟合。

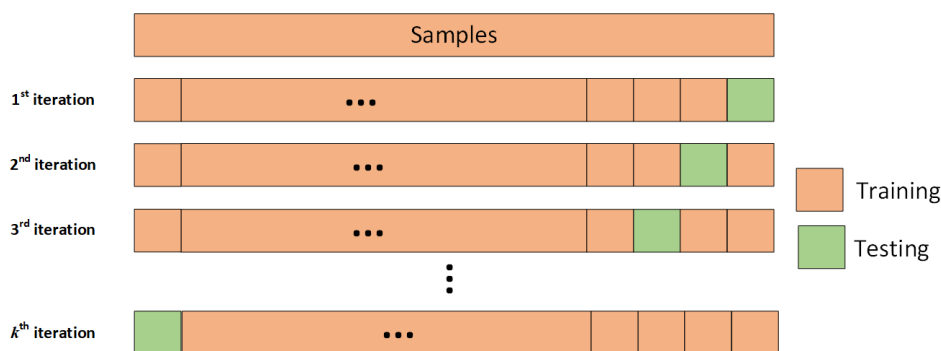
3.2.2.2 精度评估方法

1. 交叉验证

交叉验证的思路是把样本点分成两组点集: 一组叫训练集用来构建近似模型, 另一组则作为测试集来评估近似模型 (见图 3-3)。

交叉验证用来评价近似模型的预报精度, 主要是检测训练好的近似模型在未知点上的预报效果, 可以在一定程度上改善过拟合; 还可以从有限的样本点数据中分析出更多的模型信息。

当 k 等于数据集中的样本数时, 留一法 (Leave One Out) 实际上可以看做 k 折交叉验证的一个特例。这意味着每次使用 $k-1$ 个样本作为训练样本而剩下 1 个样本作为验证样本, 然后照此遍历数据集。

图3-3 k 折交叉验证示意图Fig.3-3 The scheme of k -fold cross-validation

2. 三个误差指标分析

衡量近似模型精确度还可以采用以下三个误差指标分析：最大绝对误差（Maximum absolute error, Max ABS(error)），平均绝对误差（Average absolute error, Avg ABS(error)）以及均方根差（Root mean square error, root MSE）。公式定义分别如下：

$$\text{Max ABS(error)} = \max (\hat{y}_i - y_i) \quad (3-16)$$

$$\text{Avg ABS(error)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (3-17)$$

$$\text{root MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3-18)$$

3.2.2.3 基本流程及程序实现

Kriging 模型构建流程如图 3-4，第一步输入给定的样本点的自变量和响应值（即系列船型变形参数值以及对应的目标水动力性能 CFD 结果）；第二步先将这些样本数据进行归一化，即将它们的各自变量取值均转化到一个统一的区间内，一般转为 $[0,1]$ 或 $[-1,1]$ ；第三步计算相关性矩阵 $\mathbf{R}$ ，表达出似然函数；第四步进行 Kriging 模型的参数训练，通过最大化似然函数得到参数 $\mu, \sigma^2, \theta_1, \dots, \theta_k$ 和 $p_1, \dots, p_k$ 的最佳取值；第四步构建未知点的响应和均方差预报函数。

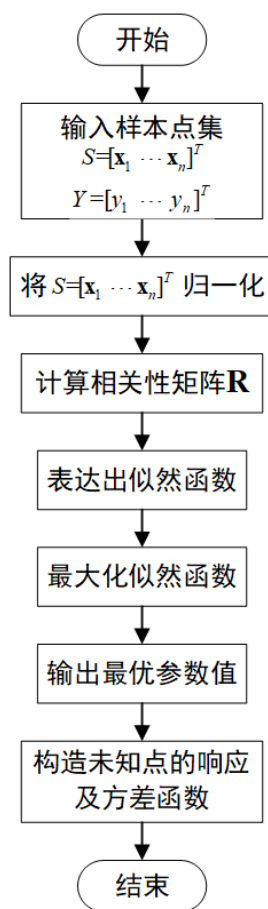


图3-4 Kriging 模型构建基本流程图

Fig.3-4 Basic flowchart of Kriging model construction

程序实现如图 3-5 所示，图中展示的是主要的功能函数：`weight_distance()`函数对应公式 (3-11)；`correlation()`函数对应公式 (3-10)；`build_R()`函数表示构造相关性矩阵 $\mathbf{R}$ ；`mu_hat()`函数对应公式 (3-13)；`sigma_squared_hat()`函数对应公式 (3-14)；`likelihood()`函数对应公式 (3-12)；`buildDACE()`函数是对公式 (3-12) 的似然函数进行优化，输出最优参数值；`predict_y()`函数是通过公式 (3-15) 预报未知点的响应值；`s2()`函数是通过公式 (3-16) 给出未知点响应估计的方差；`error_analysis()`函数是通过公式 (3-17)、(3-18) 及 (3-19) 给出近似模型的精度评估；`cross_validation()`函数是给出近似模型的交叉验证结果。

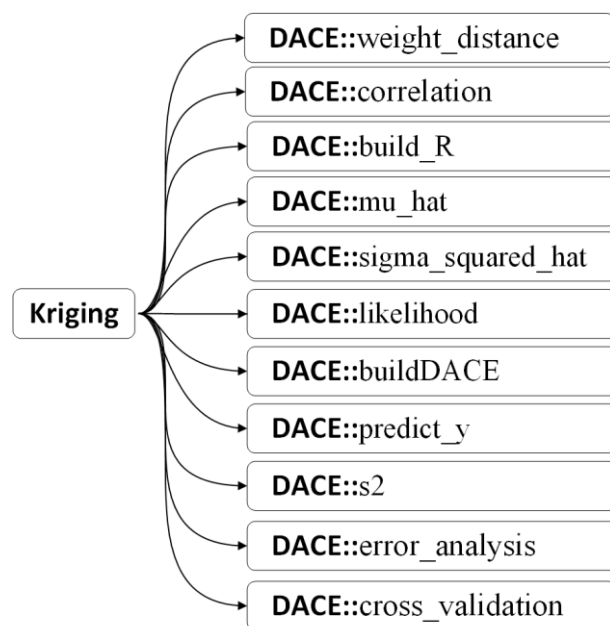


图3-5 OPTShip-SJTU 2.0 求解器中 Kriging 模型框架

Fig.3-5 Kriging model framework in OPTShip-SJTU 2.0

3.2.3 应用与验证

3.2.3.1 数学函数应用

Branin 函数通常用来作为考量近似模型的预报精度的案例之一，也是优化测试函数之一，其含有三个全局最优值。其表达式如下：

$$f(\mathbf{x}) = a(x_2 - bx_1^2 + cx_1 - r)^2 + s(1 - t)\cos(x_1) + s \quad (3-19)$$

其中， $a=1, b=5.1/(4\pi^2), c=5/\pi, r=6, s=10, t=1/(8\pi)$ 。

首先，本小节分别采用 OLHS 方法和 Sobol 方法采样，统一采样个数 30 个，然后构建 Kriging 近似模型，所得近似函数云图与 Branin 函数真实云图对比如图 3-6。从图中可见，两种采样方法得到的近似模型都较好地模拟出了真实函数，但在三个全局最小值区域附近，基于 Sobol 采样得到的近似模型拟合更贴近真实云图，可以总结在该相等数量的采样基础上，两种方法得到的近似模型在后续求解函数最小值时，Sobol 采样可能更加准确。

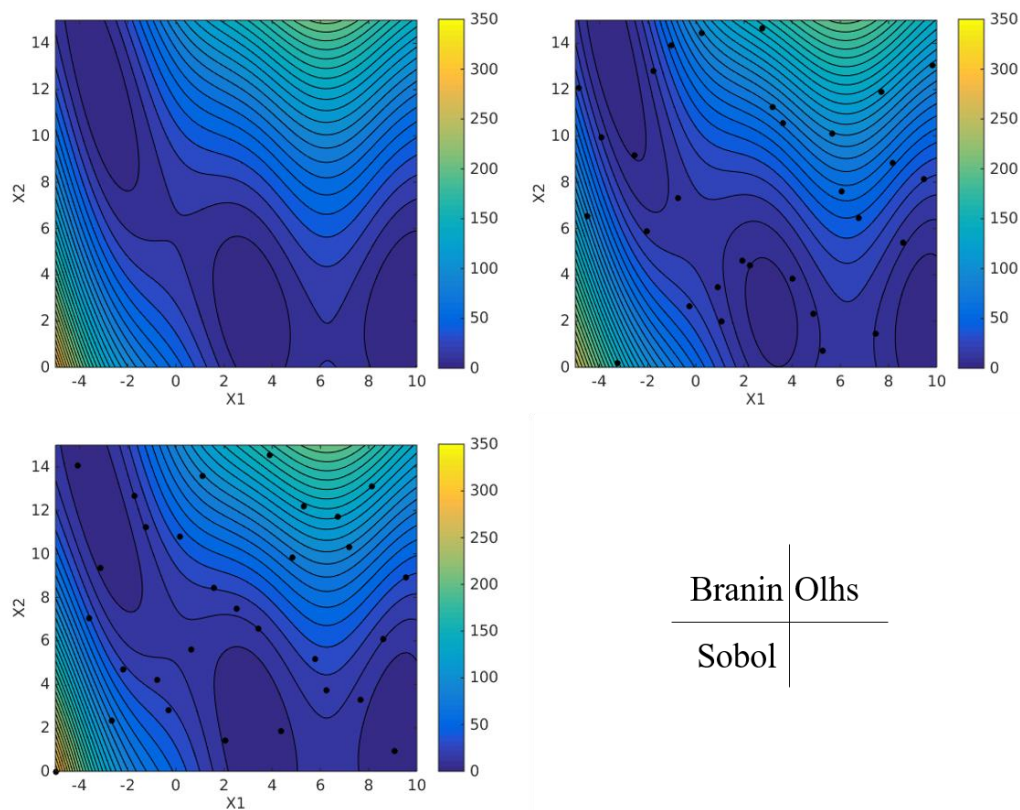


图3-6 Branin 数学函数及近似模型云图对比

Fig.3-6 The comparison of the real function contour and the approximation models' contours

其次，采样数量对近似模型的预报精度也至关重要，充足的样本点数才能得到较高的预报精度，图 3-7 是基于不同 Sobol 采样数量的 Branin 函数的近似模型构建，我们可以看出，基于 Sobol 方法采样 20 个点构建初始近似模型，图 b)中左上角和右下角的低峰区域精度较差，继续添加 10 个样本点，构建如图 c)中近似模型，该模型已经和真实函数的云图基本一致了，再添加 10 个样本点构建如图 d)中的近似模型，该模型已经和真实函数完全吻合，可以充分代替真实函数（在不知道真实函数的数学表达式的前提下）。因此，对于该函数基于 Sobol 采样 30 个点即可拟合出符合预报精度的近似模型。

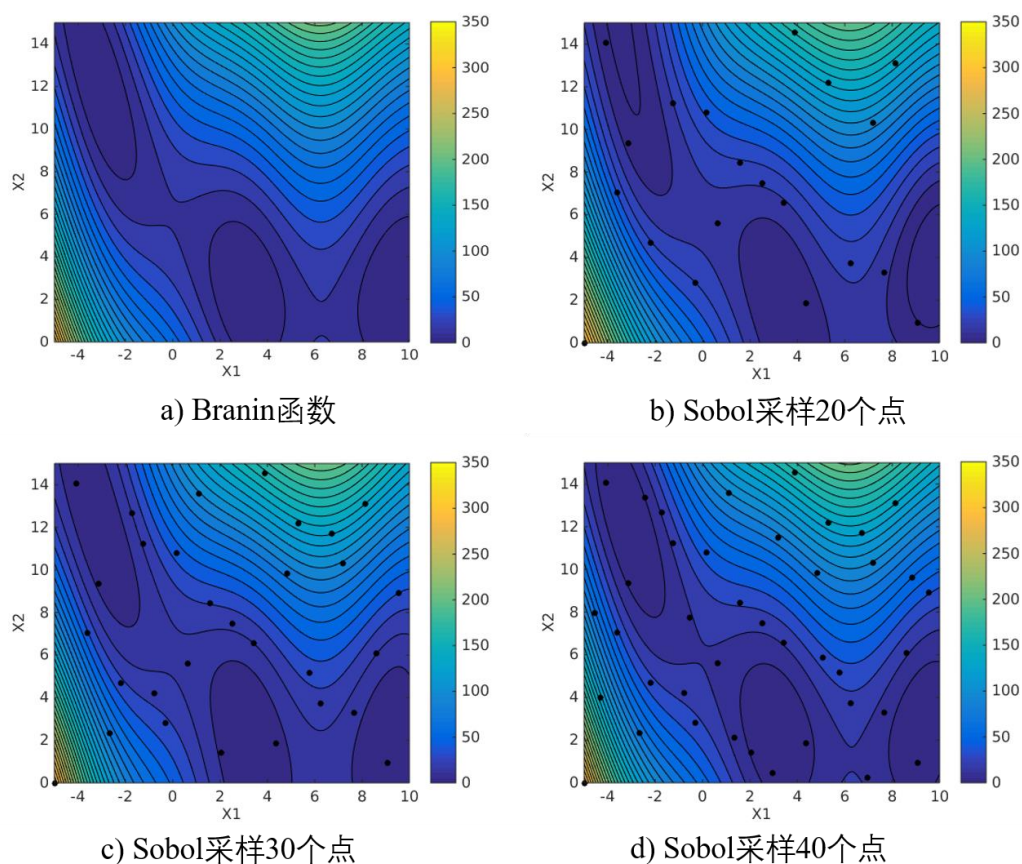


图3-7 采用 Sobol 渐进采样得到 Kriging 模型

Fig.3-7 Kriging model by Sobol progressive sampling

3.2.3.2 S60 阻力与变形参数的近似模型测试案例

本小节是关于 S60 全船优化的实例，该标准算例来自杨驰教授的文章（Huang and Yang, 2016）：优化目标是 $Fr=0.22, 0.27, 0.32$ 三个航速下的总阻力值。对 S60 的 NURBS 曲面采用的是平移法进行全船变形，即改变船型纵向排水量分布情况，以及径向基函数方法进行船舶首部局部大变形，总共涉及 7 个船型变换参数（即设计变量），分别采用 Sobol 算法和 OLHS 算法生成两组样本点，每组包含 64 个新船型，并通过 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 数值计算得到总阻力值。然后构建三个航速下总阻力值关于船型变换参数的近似模型，相互校验两种采样方法得到的近似模型的准确性（如图 3-8 和 9）。从图 3-8 和 3-9 中可以看出，基于 CFD 计算的三个航速下总阻力值与对应近似模型预报的总阻力值非常吻合，由此可见两种方法得到的近似模型的预报精度都非常高。这保证了近似模型应用于优化设计的可行性和可靠性。

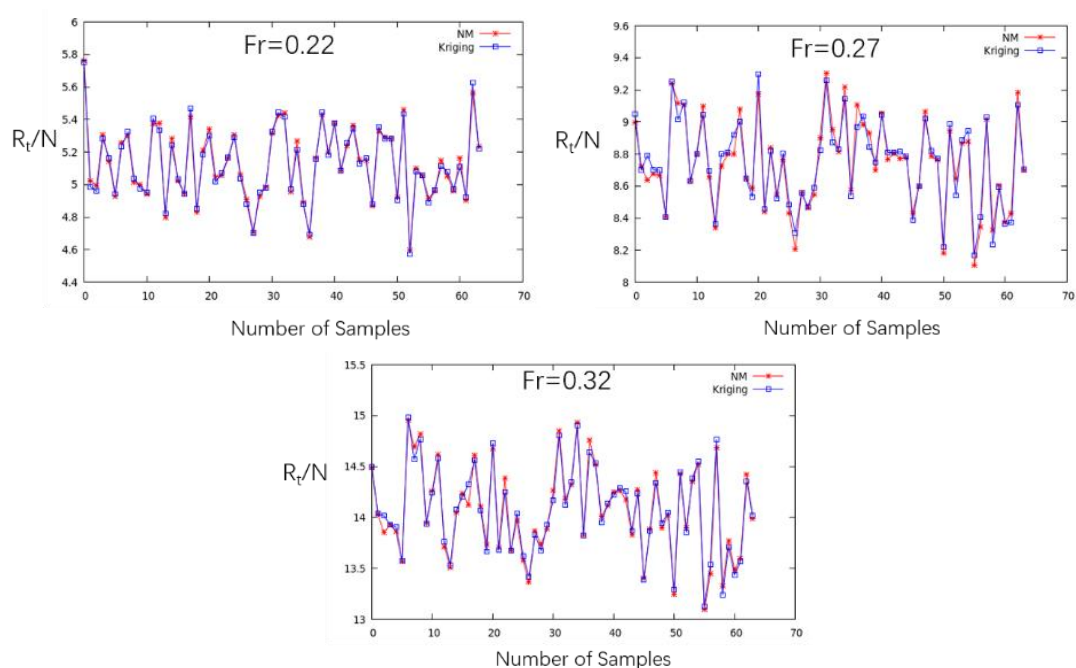


图3-8 基于 Sobol 方法得到的三个目标函数的近似模型验证

Fig.3-8 Validation of approximation models of three objective functions based on Sobol sampling

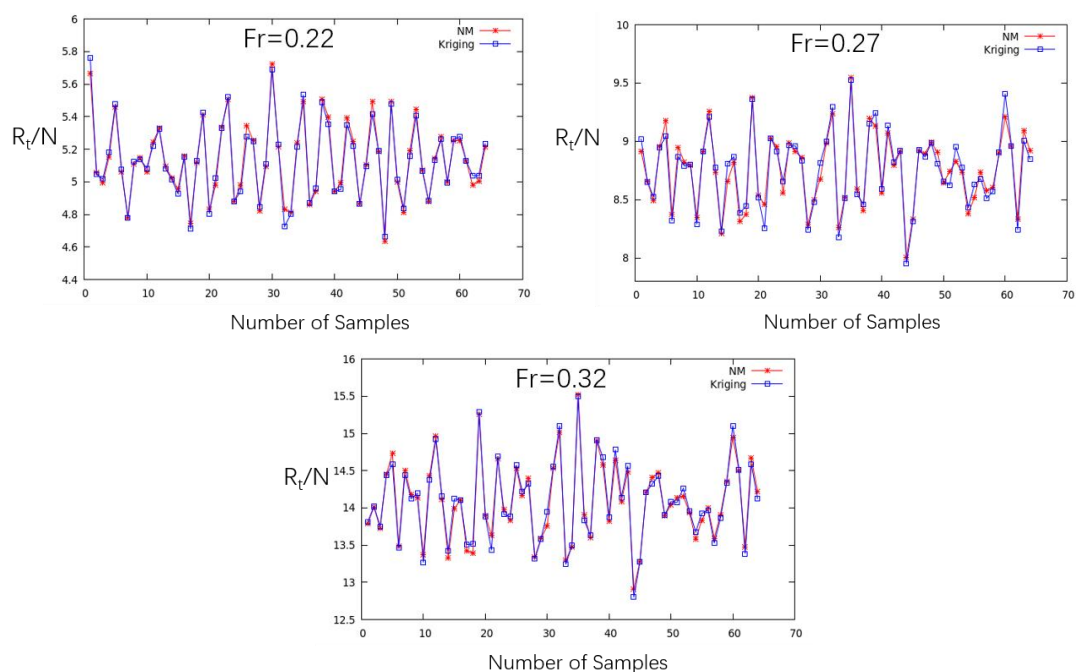


图3-9 基于 OLHS 方法得到的三个目标函数的近似模型验证

Fig.3-9 Validation of approximation models of three objective functions based on OLHS sampling



3.3 船舶目标性能的优化求解方法

优秀的船舶目标性能的优化求解算法既能保证收敛于全局最优性能解，又能尽可能地减少目标性能的评价次数。

3.3.1 遗传算法

遗传算法属于进化算法中的一种算法，依据达尔文生物进化论的“自然选择”产生的启发式算法，遗传算法作为一种较为成熟的全局优化算法，在很多工程优化问题上已有成功应用。根据优化问题的目标函数个数，分为单目标遗传算法和多目标遗传算法。

3.3.1.1 单目标遗传算法

首先我们介绍下单目标优化问题，其数学定义如下：

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(\mathbf{x}) \\ & \text{subject to} && g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i=1, \dots, p \\ & && h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j=1, \dots, q \end{aligned} \quad (3-20)$$

其中， $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_m)$ 是设计变量； $f(\mathbf{x})$ 是目标函数； $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$ 表示不等式约束条件； $h_j(\mathbf{x}) = 0$ 表示等式约束条件； $p \geq 0$ 和 $q \geq 0$ 。

那么， $\mathbf{X} = \{\mathbf{x} | \mathbf{x} \in R^m, g_i(\mathbf{x}) \leq 0, h_j(\mathbf{x}) = 0, i=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, q\}$ 叫做上述公式的可行域，即设计空间。

如果 p 和 q 都等于 0，则该优化问题称之为无约束优化问题。

一、基本原理及概念

遗传算法（Whitley, 1994）是一种基于“适者生存”和“优胜劣汰”的优化算法。基本原理是：始于将问题解编码表示的“染色体”组成的“种群”，通过选择、交叉、变异将其一代代不断进化，最终收敛到最适应环境的群体，从而求得问题的最优解或满意解。因此，它是一种高度并行、随机和自适应的优化算法。

在介绍遗传算法的基本步骤之前，先详细介绍一下算法相关的几个重要概念：

1) 基因、染色体（个体）和种群

我们首先将要解决的问题表达成一个数学问题，如公式(3-20)，即“数学建模”，该问题的一个解叫做一条“染色体”或者一个“个体”。一般地，一个解由多个元素构成，那么这每一个元素就叫做个体上的一个“基因”。种群就是由多个个体构成。



2) 编码

由上述可知, 每一个“染色体”都是多个“基因”编码表示。常见的编码方法有二进制编码、实数编码。

二进制编码是使用二值符号集 $\{0,1\}$, 它所构成的个体基因型是一个二进制编码符号串。该方法编码解码操作都比较简单快捷, 而且非常方便交叉和变异。但是对于连续性函数的优化问题, 因为连续性的数值之间二进制数差别非常大。比如 63 和 64 对应的二进制分别是 0111111 和 1000000。所以, 如果变异后远离最优解, 那么表现出来的就是寻优不稳定, 因此局部搜索能力差。

实数编码选择某范围内的一个实数代表个体基因, 编码的长度等于设计变量的个数。该方法精度高, 适合连续变量问题, 计算复杂度低, 因此效率高。目前较为常用。本文采用的是实数编码。

2) 适应度函数

遗传算法中适应度函数一般是目标函数, 它是用来评价一个解的好坏, 能够选择出优秀的个体且淘汰差劲的个体。

值得说明的是, 这里有时适应度函数是对目标函数进行了一些变换所标定的, 比如线性变换、幂律变换、对数变换等。这样做的原因有两点: 1) 如果有时候一些个体对应的目标函数之间相对差别可能不太大, 这时个体被选出的概率差不多, 导致遗传算法的选择功能弱化, 有可能只能得到局部优解; 2) 如果目标函数之间相对差别大, 则这时选择功能被强化, 选择压力变大。因此, 适应度函数的确定不应该太大, 但又有一定的差别。

二、基本步骤及流程

遗传算法的基本步骤:

- 1) 初始化种群: 根据第三章所述的优化超立方拉丁方法, 生成含有 N 个个体的第一代种群 $P=\{X_1, \dots, X_n\}$, 所有个体经过编码后作为优化问题的初始解;
- 2) 计算适应值: 根据指定的适应度函数, 对种群中 N 个个体的适应值进行计算, 并且由小到大进行排列。适应值越小的个体越优秀;
- 3) 复制选择操作: 从种群中选择优良的个体直接原封不动地复制给下一代, 本文采用二元锦标赛方法每次从种群中选择两个个体, 然后根据适应度大小, 选择较优的个体进入下一代;
- 4) 交叉操作: 在遗传算法中每一次的迭代被称之为“进化”, 每次进化需要生成新的个体, 而新的个体的产生首先需要一对个体作为其“父母”, 而“父母”是通过前面所提的选择操作从上一代的种群中寻找两个不同的优秀的个



体，然后通过“交叉”操作获得新的个体。本文交叉方式采用的是**模拟基于二进制的单点交叉操作**：<https://www.bbsmax.com/A/D854ep7pdE/>

- 5) 变异操作：交叉操作通过交换基因的组合顺序，改变了种群中的个体但整个种群的基因并未发生变化，这个操作并非真正全面的种群“进化”，因此有可能陷入局部最优的“僵局”，循环往复也无法获得全局最优解，为了解决这个“僵局”，引进“变异”操作。变异操作就是对交叉产生的新个体进行如下操作：随机选择若干个基因，然后随机修改掉原基因，从而得到全新的个体。新的种群就由全新的基因构成。这样就会拥有更加强大的探索能力，更有利于算法得到全局最优解。

因此，遗传算法的基本流程如图 3-10 所示：

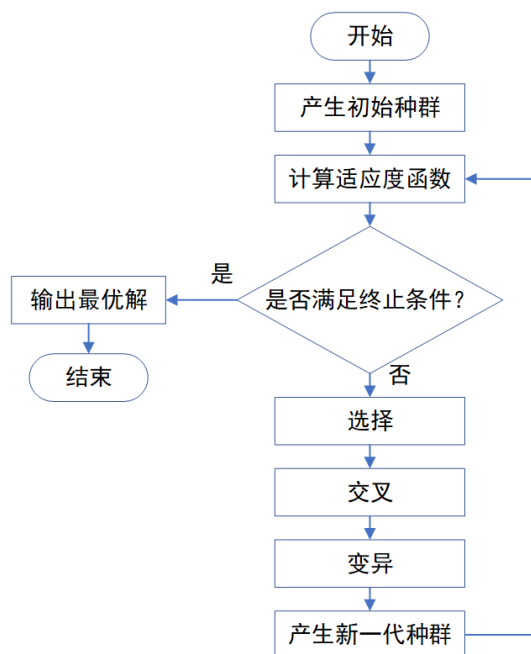


图3-10 遗传算法基本流程

Fig.3-10 The basic flowchart of genetic algorithm

3.3.1.2 多目标遗传算法：NSGA-II

首先我们介绍下多目标优化问题，其数学定义如下：

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f_r(\mathbf{x}), \quad r = 1, \dots, n \\ & \text{subject to} && g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, p \\ & && h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j = 1, \dots, q \end{aligned} \quad (3-21)$$



其中, $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_m)$ 是设计变量; $f_r(\mathbf{x})$ 是第 r 个目标函数; $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$ 是不等式约束条件; $h_j(\mathbf{x})=0$ 是等式约束条件; $p \geq 0$, $q \geq 0$ 和 $n \geq 2$ 。

那么, $\mathbf{X}=\{\mathbf{x}|\mathbf{x} \in R^m, g_i(\mathbf{x}) \geq 0, h_j(\mathbf{x})=0, i=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, q\}$ 称为上述公式的可行域, 即设计空间。

如果 p 和 q 都等于 0, 则该优化问题称之为无约束优化问题。

多目标优化问题的解通常不是唯一的。若要求所有目标函数均达到最优, 一般很难, 尤其是当各个目标函数之间存在矛盾时。多目标的解集称为非支配前沿, 又叫 Pareto 解集。

NSGA-II 算法是一种快速带精英策略的多目标遗传算法, 它是基于 NSGA 算法 (Srinivas et al., 1995; Deb et al., 2000) 进一步改进发展而来。主要区别在于 NSGA-II 算法采用了非支配排序和拥挤度算子, 使得所有最优秀的解得以保存下来。根据 Deb (2000) 等对于有约束的多目标优化问题, 支配关系进行了进一步地改进。

多目标遗传算法与单目标遗传算法的主要区别在选择操作, 而交叉、变异操作基本相同。下面着重介绍下选择相关的关键概念。

一、关键概念

1) 支配与非支配关系 (Pareto Dominance)

从数学的角度, 针对公式 (3-21), 任意给定两个设计变量 $\mathbf{x}_a$ 和 $\mathbf{x}_b$, 如果同时满足以下两个条件, 则称 $\mathbf{x}_a$ 支配 $\mathbf{x}_b$ 。

a) 对于 $\forall i \in 1, 2, \dots, n$, 都有 $f_i(\mathbf{x}_a) \leq f_i(\mathbf{x}_b)$;

b) $\exists i \in 1, 2, \dots, n$, 使得 $f_i(\mathbf{x}_a) < f_i(\mathbf{x}_b)$ 成立;

否则, 称 $\mathbf{x}_a$ 和 $\mathbf{x}_b$ 是一个非支配的关系。

2) Pareto 最优解 (Pareto Optimal Solution)

如果一个解 $\mathbf{x}^*$ 不被其他的解支配, 它就被称为 Pareto 最优解。

3) Pareto 集 (Pareto Set)

如果一组最优解集中两两解相互都是非支配的关系, 则这个解集就叫 Pareto 集。

4) Pareto 前沿 (Pareto Front)

Pareto 集中每一个解对应的目标函数值向量组成的集合称之为 Pareto 前沿。

二、关键步骤及流程



Deb 在 2000 年提出了对于 NSGA 算法的改进方法：一种带精英策略的快速非支配排序遗传算法（NSGA-II），他提出了三方面的重大改进：

- 1) 引入了快速非支配排序方法，由此改进后的算法复杂度被降低。
- 2) 引进了拥挤度和拥挤度比较算子，区别于原先的共享函数方法，使得 Pareto 前沿的个体分布更加均匀。
- 3) 引入了精英策略，扩大了采样空间，将父代种群和子代种群合并成临时新种群，共同参与竞争产生下一代种群，从而保存最佳个体，加快进化种群。

因此，下面介绍几个关键步骤：

1) 快速非支配排序：

给定种群大小为 P ，该方法涉及两个重要参数：种群中每个个体 p 被支配的个体个数 n_p 和该个体支配的个体的集合 S_p 。

该方法的步骤如下：

- a) 计算种群中所有个体的两个重要参数 n_p 和 S_p ；
- b) 将种群中参数 $n_p=0$ 的个体加入集合 F_1 中，此时可以将该集合中的个体的 Pareto 等级设为 1；
- c) 对于集合 F_1 中的所有个体 i ，其所支配的个体集合记为 S_i ，遍历 S_i 当中的每个个体 l ，执行 $n_l = n_l - 1$ ，如果 $n_l=0$ 则将个体 l 保存到新的集合 F_2 中；
- d) 步骤 c) 得到的集合 F_2 的所有个体的 Pareto 等级设为 2；然后对集合 F_2 的所有个体重复步骤 c)，依次类推将种群中所有个体等级全部划分。

由此，我们认为非支配等级值越小的个体越优秀。

2) 拥挤度计算：

如果多个不同个体具有相同非支配等级（以下称同层），则原先的选择操作无法考虑这类情况，此时 NSGA-II 算法采用了一个叫“个体拥挤度排序”的策略。

任一个体的拥挤度（拥挤距离）表示其和两个相邻个体在所有子目标函数上的距离差之和，则种群中第 i 个个体拥挤度定义如下：

$$D_i = \sum_{j=1}^n [(f_{i+1,j} - f_{i-1,j}) / (f_{\max,j} - f_{\min,j})] \quad (3-22)$$

其中， $f_{i+1,j}$ 代表第 $i+1$ 个个体的第 j 个目标函数值； $f_{i-1,j}$ 代表第 $i-1$ 个个体的第 j 个目标函数值； $f_{\max,j}$ 代表第 j 个目标函数在当前种群中的最大值； $f_{\min,j}$ 代表第 j 个目标函数在当前种群中的最小值。



详细的计算步骤:

- a) 初始化种群中同层的个体距离, 令 $L[i]_{distance} = 0$ (其中, $L[i]_{distance}$ 代表个体 i 的拥挤距离);
- b) 将同层的个体按照第 j 个目标函数值升序排列;
- c) 为了排序边缘上的个体具有被选择权利, 给定一个大数 W , 令 $L[1]_{distance} = L[r]_{distance} = W$ (假设该层总共有 r 个个体);
- d) 计算排序中间的个体拥挤距离:

$$L[i]_{distance} = L[i]_{distance} + (L[i+1]_j - L[i-1]_j) / (f_j^{\max} - f_j^{\min}) \quad (3-23)$$

其中, $L[i+1]_j$ 表示第 $i+1$ 个个体的第 j 个目标函数值, $f_j^{\max}$ 和 $f_j^{\min}$ 分别为同层第 j 个目标函数的最大和最小值。

- e) 对所有的目标函数一一按照步骤 b)~d) 顺序操作, 计算出第 i 个个体的拥挤距离值 $L[i]_{distance}$, 按照拥挤距离从大到小排序, 优先选择拥有较大距离值的个体, 从而保证了被选个体在设计空间比较均匀地分布, 以维持种群的多样性。
- 介绍完 NSGA-II 算法的关键步骤后, 我们给出整个算法的基本流程, 如图 3-11:

- 1) 随机初始化第一代种群 P_0 , 对 P_0 进行非支配排序操作, 得到所有个体的非支配等级;
- 2) 从种群 P_t (第 t 次循环的种群) 选择个体 (本文采用二进制锦标赛法), 并进行交叉和变异操作, 得到新一代种群 Q_t ;
- 3) 合并 P_t 和 Q_t 产生组合种群 $R_t = P_t \cup Q_t$, 并对 R_t 进行非支配排序操作;
- 4) 从种群 R_t 通过非支配等级和拥挤度选择 N 个个体, 构成下一代种群 P_{t+1} ;
- 5) 重复步骤 2)~4), 直到满足结束条件。

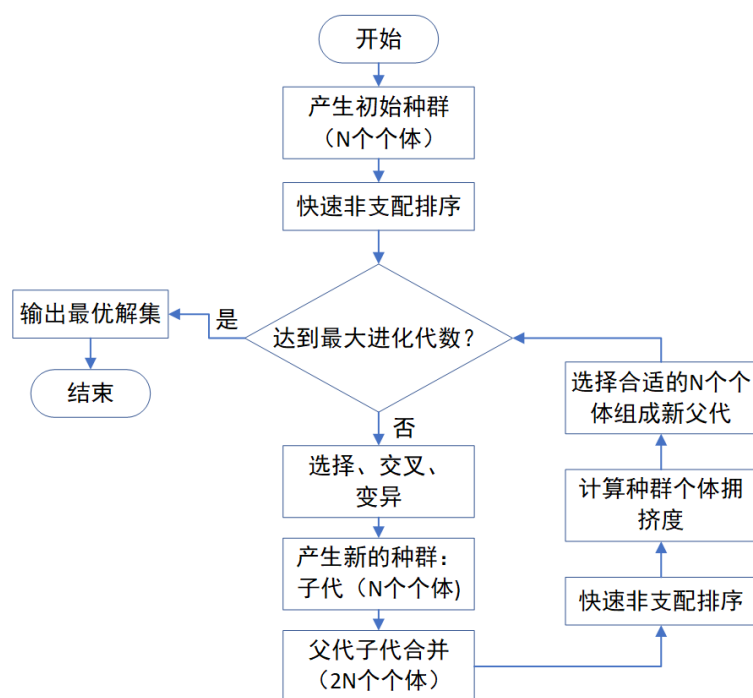


图3-11 NSGA-II 算法基本流程

Fig.3-11 The basic flowchart of NSGA-II algorithm

3.3.1.3 标准优化测试函数验证

为了验证所开发的单目标和多目标遗传算法程序的可靠性，采用了常用的优化测试函数进行验证。

1) 单目标优化问题

首先是一系列的单目标优化问题以及通过本求解器的单目标遗传算法得到的优化解。系列函数的详细信息以及所得最优解见表 3-1 所示。这里采用了相同的遗传算法配置：种群个体数为 100，遗传率为 0.8，交叉率为 0.2，变异率为 0.35，最大迭代数设置为 400。从表中可以看出，选择的函数的区别体现在以下四个方面：设计空间的维度、极值点的多少、全局最优解的多少、梯度变化等。值得注意的是：由于遗传算法的结果具有随机性，因此，表中的结果都是程序跑 10 次所得平均值。（注：在船型优化实际问题中也是经过多次实施优化迭代，选择最优结果。）将所得最优解与真实解进行了对比（见表 3-2）。对于低维函数误差几乎为 0，并且结果很稳定；而高维函数 Hartmann-6D、Michalewicz-5D 以及 Michalewicz-10D 得到的结果误差相对较大，并且结果也不稳定（标准差相对大），但在误差允许范围内。



表3-1 基于 SOGA 算法得到的系列函数最优解

Table 3-1 The optimal solutions of a series of functions based on SOGA

函数名	描述	维度	设计空间	最优解
Branin-Hoo	包含三个全局最小值	2	$x1 \in [-5, 10]$ $x2 \in [0, 15]$	0.397887
Ackley	包含许多极值	2	$[-32.768, 32.768]$	0
Cross-in-Tray	包含多个全局最小值	2	$[-10, 10]$	-2.06261
Rotated Hyper-ellipsoid	连续、凸包、单峰函数	2	$[-65.536, 65.536]$	0
Mccormick	非常平坦但是只有一个全局最小值	2	$x1 \in [-1.5, 4]$ $x2 \in [-3, 4]$	-1.9133
Hartmann-3D	包含 4 个局部最小值，多峰函数	3	$[0, 1]^D$	-3.86278
Hartmann-6D	包含 6 个局部最小值，多峰函数	6	$[0, 1]^D$	-3.32237
Michalewicz-2D	包含 2 个极小值，存在较大的梯度变化	2	$[0, \pi]^D$	-1.8013
Michalewicz-5D	包含 120 个极小值，多峰函数，存在较大的梯度变化	5	$[0, \pi]^D$	-4.687658
Michalewicz-10D	包含 $10!$ 个极小值，多峰函数，存在较大的梯度变化	10	$[0, \pi]^D$	-9.66015

表3-2 系列函数基于 SOGA 算法得到的最优解误差

Table 3-2 Error analysis of optimal results of a series of functions based on SOGA

函数名	维度	最优解	计算值		误差(%)
			均值	标准差	
Branin-Hoo	2	0.397887	0.397887	1.11E-10	/
Ackley	2	0	8.63E-06	6.21E-06	/
Cross-in-Tray	2	-2.06261	-2.062612	2.52E-11	/
Rotated Hyper-ellipsoid	2	0	9.27E-11	1.72E-10	/
Mccormick	2	-1.9133	-1.913223	1.52E-10	-0.0040
Hartmann-3D	3	-3.86278	-3.86278	4.64E-09	/
Hartmann-6D	6	-3.32237	-3.242897	0.056194	-2.3920
Michalewicz-2D	2	-1.8013	-1.801303	1.41E-09	/
Michalewicz-5D	5	-4.687658	-4.628131	0.067363	-1.2699
Michalewicz-10D	10	-9.66015	-9.388282	0.157446	-2.8143



2) 多目标优化问题

本节采用了两个常用的多目标优化测试函数：

a) Zitzler-Deb-Thiele's function N.3:

$$\min \begin{cases} f_1(x) = x_1 \\ f_2(x) = g(x)h(f_1(x), g(x)) \\ g(x) = 1 + \frac{9}{29} \sum_{i=2}^{30} x_i \\ h(f_1(x), g(x)) = 1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} - \left(\frac{f_1(x)}{g(x)}\right) \sin(10\pi f_1(x)) \end{cases} \quad (3-24)$$

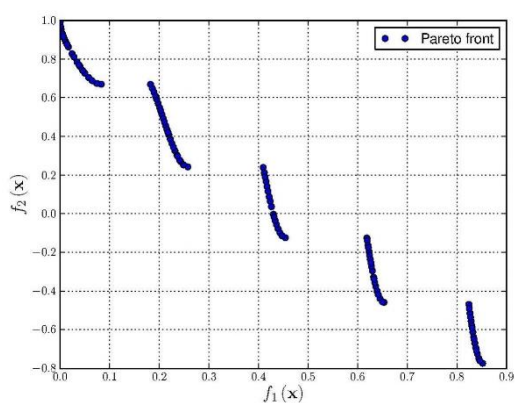
其中, $0 \leq x_i \leq 1, 1 \leq i \leq 30$

b) Osyczka and Kundu function:

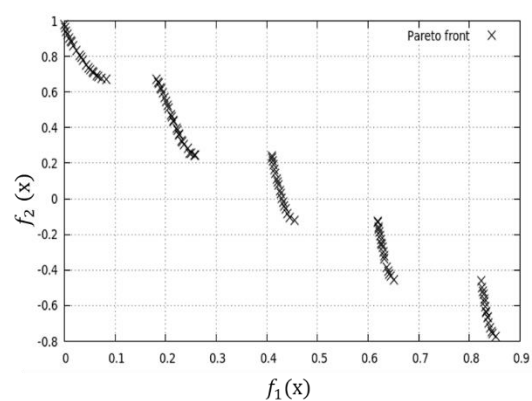
$$\min \begin{cases} f_1(x) = -25(x_1 - 2)^2 - (x_2 - 2)^2 - (x_3 - 1)^2 - (x_4 - 4)^2 - (x_5 - 1)^2 \\ f_2(x) = \sum_{i=1}^6 x_i^2 \end{cases} \quad (3-25)$$

$$\text{s.t.} = \begin{cases} g_1(x) = x_1 + x_2 - 2 \geq 0 \\ g_2(x) = 6 - x_1 - x_2 \geq 0 \\ g_3(x) = 2 - x_2 + x_1 \geq 0 \\ g_4(x) = 2 - x_1 + 3x_2 \geq 0 \\ g_5(x) = 4 - (x_3 - 3)^2 - x_4 \geq 0 \\ g_6(x) = (x_5 - 3)^2 + x_6 - 4 \geq 0 \end{cases} \quad (3-26)$$

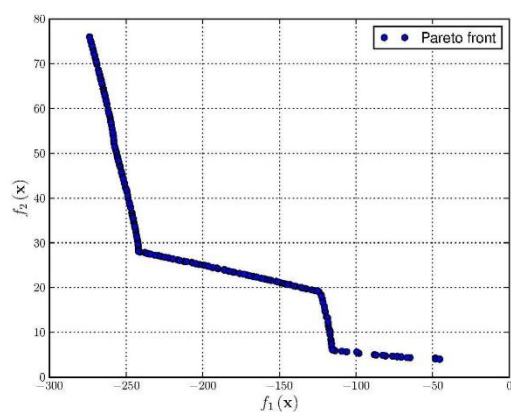
其中, $0 \leq x_1, x_2, x_6 \leq 10, 1 \leq x_3, x_5 \leq 5, 0 \leq x_4 \leq 6$



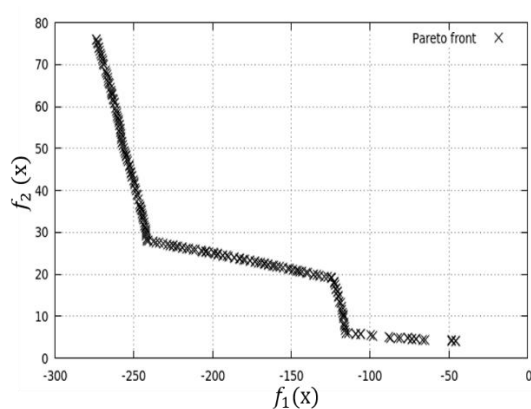
(a) ZDT3 真实 Pareto 解集



(b) 本求解器所得 Pareto 解集



(c) OSY 真实 Pareto 解集



(d) 本求解器所得 Pareto 解集

图3-12 测试函数基于 MOPSO 算法所得优化解与标准解对比

Fig.3-12 The comparison of the Pareto solution based on MOPSO and the real Pareto solution

由此可见,本求解器采用的多目标遗传算法是可靠的,可以用于船体型线优化设计。

3.3.2 基于近似模型的高效全局优化算法

船型优化问题的难点之一在于数值模拟需要很长的时间,而基于近似模型的高效全局优化算法可以大大降低耗时长的问题。它的基本思想是首先采用试验设计采样,进而构造一个初始的近似模型,然后通过加点法则进行迭代加点,最终收敛到最优解。由于加点法则既考虑了目标函数最小值,又考虑了近似模型标准差最大的区域,所以自动兼顾了全局搜索和局部搜索。本文 EGO 优化算法是在 Kriging 近似模型的基础上提出的。

3.3.2.1 单目标 EGO 算法

本文根据 Jones 等人提出的期望改善函数思想开发的 EGO 优化算法。该算法本身属于单目标优化算法,期望改善函数的概念最早是由 Mockus 在 1978 年提出,下面首先介绍这个重要的概念:“期望改善”(Expected Improvement, EI)。

假设初始采样点的个数是 n ,使得 $f_{\min} = \min(y^{(1)}, \dots, y^{(n)})$ 为当前函数最小值。在我们采样未知点 $\mathbf{x}$ 时,其实它的函数值 $y(\mathbf{x})$ 是不确定的。当然,它的值是唯一的,只是我们不知道。但我们可以把 $y(\mathbf{x})$ 的不确定性作如下处理:认为它是一个符合正态分布的随机变量 $Y \sim N(\hat{y}, s^2)$,其中 $\hat{y}$ 是 Kriging 模型预报的值, s^2 是 Kriging 模型预报的方差。

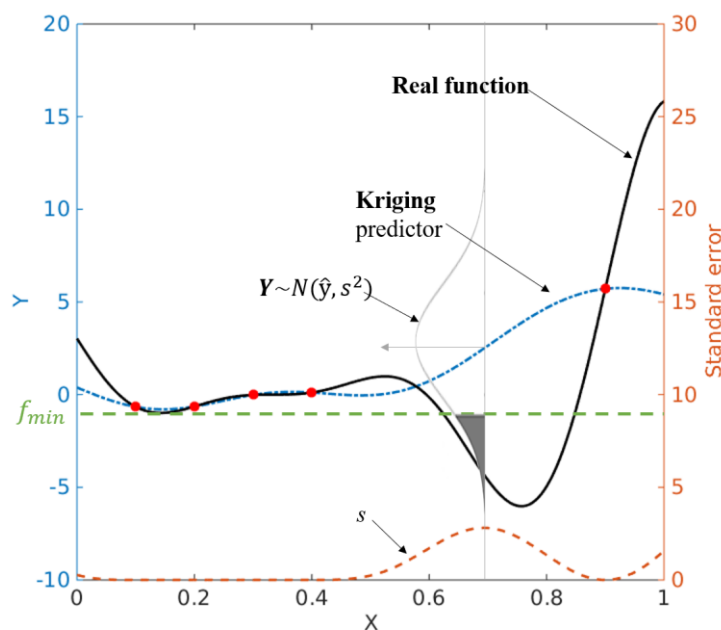


图3-13 一维函数的近似模型和它的不确定性分析

Fig.3-13 Kriging model for a function and its uncertainty

比如从图 3-13 中，对于样本点 $x = 0.77$ ，我们认为这点的函数值是一个随机变量 Y ，给出了其正态分布 $Y \sim N(\hat{y}, s^2)$ 密度函数曲线，那么由图可见，它是有比目前的最小值 $f_{\min}$ 更小的可能性的，因为密度函数曲线延伸至直线 $y = f_{\min}$ 下。不同的密度函数与在直线 $y = f_{\min}$ 下的不同距离（或者比目前最小值的不同提高量）有直接关系。如果我们以此衡量这些可能的提高量，我们就可以得到“期望改善”。

从数学上正式地定义，假设在样本点 $\mathbf{x}$ 的提高量 $I = \max(f_{\min} - Y, 0)$ 。这个 I 也是一个随机变量，因为 Y 是一个随机变量（它代表在 $\mathbf{x}$ 点的函数值的不确定性）。为了获得“期望改善”，我们采用下面这个表达式来计算：

$$E[I(\mathbf{x})] \equiv E[\max(f_{\min} - Y, 0)] \quad (3-27)$$

其中，我们认为随机变量 $Y \sim N(\hat{y}, s^2)$ ，其中 $\hat{y}$ 是 Kriging 模型预报的值， s^2 是 Kriging 模型预报的方差。将上式右边项可用积分形式表示，再通过一系列冗长的推导可以得到以下封闭形式的表达：

$$E[I(\mathbf{x})] = (f_{\min} - \hat{y})\Phi\left(\frac{f_{\min} - \hat{y}}{s}\right) + s\phi\left(\frac{f_{\min} - \hat{y}}{s}\right) \quad (3-28)$$

其中， $\phi(\cdot)$ 和 $\Phi(\cdot)$ 是标准正态密度函数和标准正态分布函数。



图 3-13 表示简单的一维函数的期望改善函数。令人惊讶地，它有两个峰值，一个是在 $x=2.8$ ，另一个是在 $x=8.3$ ，后者的峰值较大，所以我们在此处加点。然后到了下一次迭代，期望改善函数已经改变，如图 3-13 所示，这时，期望改善的最大值在 $x=8.8$ ，这时我们在此处加点，可见这是一个全局搜索的过程。

通过上述例子，期望改善函数是一个多峰函数。事实上，期望改善函数在样本点处值为 0，并且其他地方的值都是正数（尽管也许会很小）。这些性质使得对期望改善函数寻优较为困难。

$$\frac{\partial E(I)}{\partial \hat{y}} = -\Phi\left(\frac{f_{\min} - \hat{y}}{s}\right) < 0 \quad (3-29)$$

$$\frac{\partial E(I)}{\partial s} = \phi\left(\frac{f_{\min} - \hat{y}}{s}\right) > 0 \quad (3-30)$$

EI 加点准则的思想是 $E[I(\mathbf{x})]$ 最大的点加入到样本点，重新构建 Kriging 模型。基于 EI 函数的加点准则同时考虑了搜索位置处的预测值和预测误差。当某点的预测值很小时， $(f_{\min} - \hat{y}(\mathbf{x}))$ 就很大，上式偏向第一项，预测值就占主导地位，引导 EGO 算法向预测值极小处迭代寻优。当某点的预测误差很大时，上式偏向第二项，引导 EGO 算法向预测误差极小处迭代寻优。由于 EI 函数的该原理，EGO 算法很好地避免搜索过程陷入局部最优的风险，达到同时兼顾寻优效率和全局寻优的效果。另外，很重要的一点它也避免了过度依赖近似模型的精度。

图 3-14 表示简单的一维函数根据期望改善函数不断添加新的样本点示意图。图中实线表示真实函数，虚线表示近似模型，黄色区域表示 $\hat{y} \pm s$ ，红色点表示初始样本点，绿色点表示已新添的样本点，蓝色点表示即将新添的样本点。初始时，采样六个样本点构建了近似模型，可以看出近似模型与真实函数曲线还存在一定差距。当第二次迭代时，可见在 $x=2.5$ 时，EI 值最大，此时在此添加新的样本点，重构近似模型（如图 3-14（a）图）；当第五次迭代时，EI 最大值出现在 $x=17.4$ 左右处，则在此添加新的样本点重新构建近似模型，如图 3-14（b），此时近似模型曲线与真实函数曲线趋于一致。从上面的加点过程来看，第二次加点时 EI 值最大处是预报方差较大处，而第五次加点时 EI 值最大处发生在 $\hat{y}$ 较小值处，这表明 EGO 方法既考虑了近似模型局部精度问题，同时又在不断地探求全局最优值。

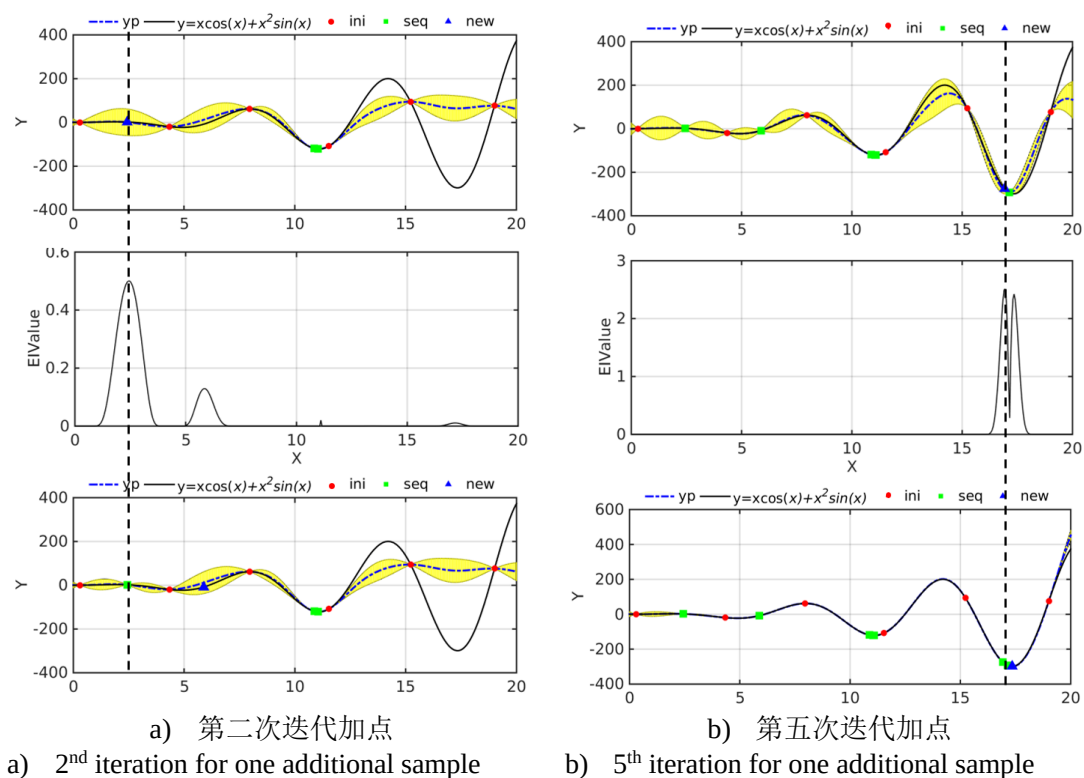


图3-14 基于 EGO 方法的一维函数寻优示意图

Fig.3-14 Optimization for a one-dimensional function based on EGO method

通过上述例子，我们发现期望改善函数是一个多峰函数。事实上，期望改善函数在样本点处值为 0，并且其他地方的值都是正数（尽管也许会很小）。这些性质使得对期望改善函数寻优较为困难，本文结合前面开发的遗传算法进行全局寻优。

EGO 全局优化算法主要包含试验设计、Kriging 模型构建和利用 EI 函数寻优加点进行优化迭代三部分。本文开发的 EGO 算法具体流程如下：

- 1) 利用优化拉丁超立方方法在设计空间采取样本点，生成设计空间的初始样本点集，采样点数 $(11k-1)$ ；
- 2) 计算所有样本点的目标函数值；
- 3) 根据所有样本点的设计变量值和目标函数值构建 Kriging 模型；
- 4) 构建 EI 函数，通过§3.3.1 的单目标遗传算法求解 EI 函数最大值对应的设计点；
- 5) 将该设计点添加入样本点集；
- 6) 验证近似模型是否满足精度要求及最终停止法则 ($\max EI < 0.1\%$)。若满足，算法停止输出最优值；否则返回到步骤 2)。



3.3.2.2 多目标 EGO 算法

单目标 EGO 算法在解决单目标优化问题上大大降低了数值模拟耗时长和计算资源耗费大的问题，而实际工程应用中存在很多的多目标优化问题，因此将 EGO 算法推广到多目标优化问题上具有非常重要的工程意义及价值。其实，EGO 算法中最重要的是 EI 加点准则，而将单目标 EGO 算法推广到多目标 EGO 算法，整个算法框架和流程依旧不变，只需要提出合理的多目标 EI 准则，而提高函数 $I = \max(f_{\min} - Y, 0)$ 不再简简单单是一维距离，而需要在多维空间中重新定义。参照詹大为（2018）的论文所述，本文采用优秀的欧氏距离 EIM 准则来实现多目标 EGO 算法。

在多目标优化问题中，最优解并非唯一，一般由多个点组成近似 Pareto 前沿，这里记为：

$$S = \begin{bmatrix} f_1^1 & f_2^1 & \cdots & f_m^1 \\ f_1^2 & f_2^2 & \cdots & f_m^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1^k & f_2^k & \cdots & f_m^k \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

其中，S 表示根据当前近似模型得到的近似 Pareto 前沿， m 表示目标函数的个数， k 表示当前 Pareto 前沿上点的个数。多目标的近似 Pareto 前沿 S 将原本单目标的唯一解 $f_{\min}$ 进行了拓展：解的个数从 1 个变成了 k 个；解的维数从 1 维变成了 m 维。因此，根据这个思想，将一维的 EI 函数拓展为二维 EI 矩阵（Expected Improvement Matrix, EIM）：

$$\mathbf{EIM} = \begin{bmatrix} EI_1^1(\mathbf{x}) & EI_2^1(\mathbf{x}) & \cdots & EI_m^1(\mathbf{x}) \\ EI_1^2(\mathbf{x}) & EI_2^2(\mathbf{x}) & \cdots & EI_m^2(\mathbf{x}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ EI_1^k(\mathbf{x}) & EI_2^k(\mathbf{x}) & \cdots & EI_m^k(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

其中的每一个元素根据公式（3-28）可得：

$$EI_i^j(\mathbf{x}) = (f_i^j - \hat{y}_i(\mathbf{x}))\Phi\left(\frac{f_i^j - \hat{y}_i(\mathbf{x})}{s_i(\mathbf{x})}\right) + s_i(\mathbf{x})\phi\left(\frac{f_i^j - \hat{y}_i(\mathbf{x})}{s_i(\mathbf{x})}\right) \quad (3-33)$$

其中， f_i^j 是近似 Pareto 前沿 S 矩阵中第 j 行第 i 列的元素，即第 j 个点的第 i 个目标分量，而 $\hat{y}_i(\mathbf{x})$ 和 $s_i(\mathbf{x})$ 表示第 i 个目标函数的 Kriging 近似模型的预测值及标准差。

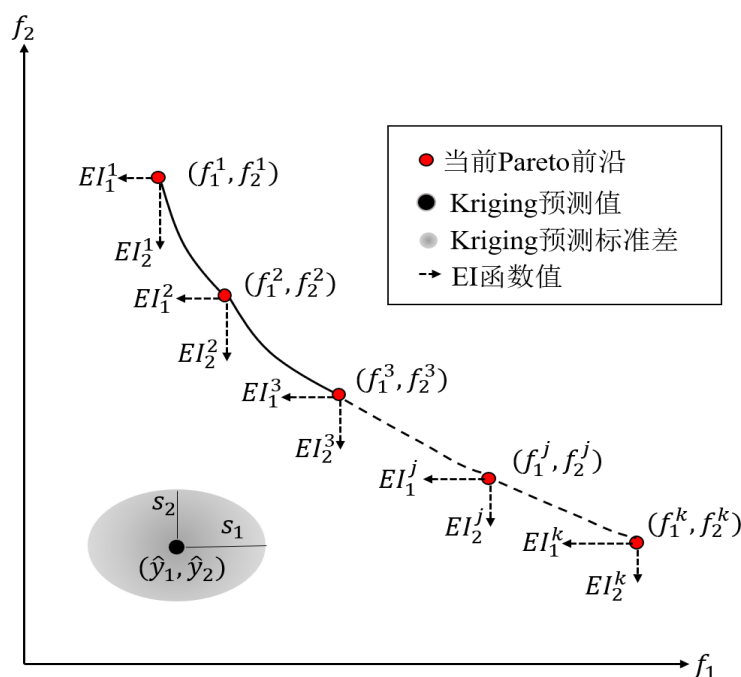


图3-15 二维 EI 矩阵示意图（詹大为，2018）

Fig.3-15 2-D example of the EI matrix

根据图 3-15 所示可以更加直观地理解公式 (3-32) 所得的一个二维 EI 矩阵。矩阵中的任一元素诸如 EI_1^j 表示的是点 $\mathbf{x}$ 与近似 Pareto 前沿上第一个非支配点的第一个坐标分量 f_1^1 在 f_1 目标方向上的 EI 值； EI_2^j 表示的是点 $\mathbf{x}$ 与近似 Pareto 前沿上第一个非支配点的第二个坐标分量 f_2^1 在 f_2 目标方向上的 EI 值，即 EI 矩阵中任一 $EI_i^j(\mathbf{x})$ 表示近似 Pareto 前沿的第 j 个点的第 i 个目标的期望提高值。因此，EI 矩阵可以用来衡量任一点对当前近似 Pareto 前沿在所有目标方向上的期望提高值，这正是多目标 EGO 算法的核心内容，但单纯 EI 矩阵还无法作为更新点的准则，必须合理利用 EI 矩阵，将其转换成一个数值量来衡量任一未知点对当前近似 Pareto 前沿点的总体提高量，进而作为多目标 EI 准则加点。

本文采用欧氏距离 EIM 准则，表示如下：

$$EIM_e(\mathbf{x}) = \min_{j=1}^k \sqrt{\sum_{i=1}^m (EI_i^j(\mathbf{x}))^2} \quad (3-34)$$

多目标 EI 加点的思想就是在 EIM 最大的点处加点，不断更新近似模型，从而不断更新近似 Pareto 前沿，该 EIM 准则具有收敛性，最终会收敛到多目标优化问题的



最优解。其基本流程跟单目标 EGO 算法流程整体相同，只是加点法则更改为 EIM 准则。

3.3.2.3 标准优化测试函数验证

为了验证单目标和多目标 EGO 算法的可靠性，采用了常用的优化测试函数进行分析验证。

1) 单目标优化问题

本节选用标准 Branin-Hoo 函数测试，该函数常用来考察近似模型的精度以及 EGO 算法可靠性。表达式如公式 (3-35)，其全局最优解：0.397887。

$$f(\mathbf{x}) = a(x_2 - bx_1^2 + cx_1 - r)^2 + s(1-t)\cos(x_1) + s \quad (3-35)$$

其中， $a=1, b=5.1/(4\pi^2), c=5/\pi, r=6, s=10, t=1/(8\pi)$ 。

通过基于单目标 EGO 算法对该函数的应用，考察了两点：1) 采用相同的初始样本点以及其他相同的参数配置，运行三次 EGO 算法（因为 EI 最值寻优采用遗传算法存在随机性）查看优化结果情况；2) 采用不同的初始样本点，其他采用相同的配置，查看优化结果情况。根据图 3-16 的结果显示，采用更多的初始样本点，EGO 算法收敛更快，这也符合实际：初始样本点越多，初始近似模型的精度越高，EGO 算法能够更快在全局最优点附近搜索；当然，采用较少的样本点，总体的目标函数评价次数并没有比采用较多的样本点数多；因此，也表明了 EGO 算法不仅依赖初始的近似模型的精度，同时又不完全依赖初始的近似模型的精度。根据图 3-17 的结果显示，多次运行 EGO 算法整个迭代收敛过程会不同，这是由于在评价 EI 准则时采用了遗传算法寻优，而遗传算法具有随机性。但即便如此，对最终优化结果并未产生影响。

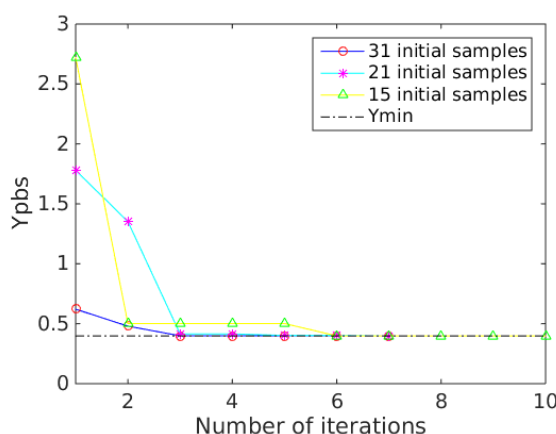


图3-16 基于不同初始样本点数的单目标 EGO 算法寻优迭代结果

Fig.3-16 Iteration results by single-objective EGO based on different initial numbers of samples

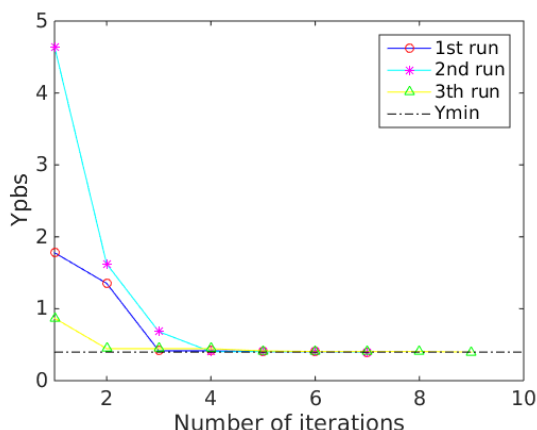


图3-17 基于相同初始样本点数的单目标 EGO 算法寻优三次迭代结果

Fig.3-17 Three iteration results by single-objective EGO based on the same initial numbers of samples

2) 多目标优化问题

本小节选择两个多目标优化测试函数 (Zhan, D., et al, 2017), 对其采用多目标 EGO 算法寻优, 并将所得结果与文献中詹大为博士的结果进行对比分析。两个测试函数分别为:

a) Zitzler-Deb-Thiele's function N.1:

$$\min \begin{cases} f_1(x) = x_1 \\ f_2(x) = g(x)h(f_1(x), g(x)) \\ g(x) = 1 + \frac{9}{29} \sum_{i=2}^{30} x_i \\ h(f_1(x), g(x)) = 1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} \end{cases} \quad (3-36)$$

其中, $0 \leq x_i \leq 1, 1 \leq i \leq 30$

b) Zitzler-Deb-Thiele's function N.2:

$$\min \begin{cases} f_1(x) = x_1 \\ f_2(x) = g(x)h(f_1(x), g(x)) \\ g(x) = 1 + \frac{9}{29} \sum_{i=2}^{30} x_i \\ h(f_1(x), g(x)) = 1 - \left(\frac{f_1(x)}{g(x)} \right)^2 \end{cases} \quad \text{其中, } 0 \leq x_i \leq 1, 1 \leq i \leq 30 \quad (3-37)$$

针对这两个测试函数, 在寻找 EIM 准则最优值时采用了相同的遗传算法参数配置, EGO 算法初始的样本点数为 $11k-1$ (k 为设计变量个数, 这里是 30)。从图 3-18 和



图 3-19 的结果显示,本文基于多目标 EGO 算法成功寻找到多目标函数的最优解集,整体上得到的结果趋势也与詹大为博士所得结果: 寻找到的最优前沿上的点数相差无几, ZDT1 在 Pareto 前沿均匀获得 37 个; 而 ZDT2 在 Pareto 前沿获得的点数是 20 个,虽然不是很均匀,但是也找到了相当数量的全局最优解。因此,采用多目标 EGO 算法非常高效, 并且结果可靠。

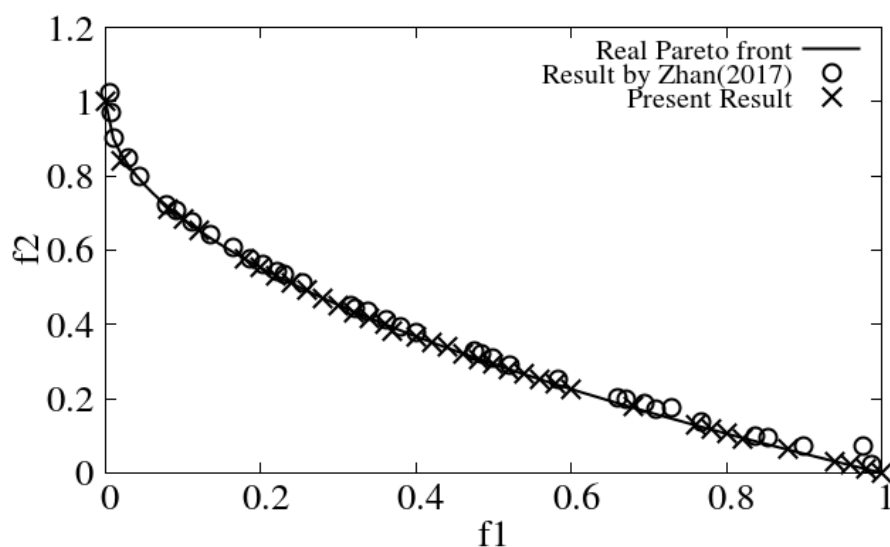


图3-18 ZDT1 的 Pareto 前沿结果对比

Fig.3-18 Comparison of Pareto fronts of ZDT1

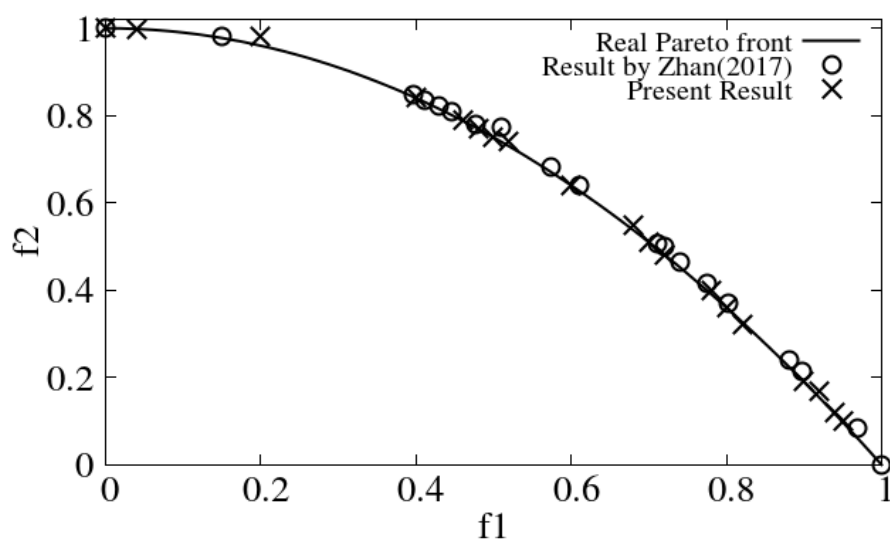


图3-19 ZDT2 的 Pareto 前沿结果对比

Fig.3-19 Comparison of Pareto fronts of ZDT2



3.4 本章小结

本章节首先提出了船型优化设计中面临的数值计算量巨大问题，针对该问题研究了船舶目标性能的近似模型构建方法以及高效的优化算法。第一部分首先研究和开发了采样方法：优化拉丁超立方采样方法和 Sobol 采样方法；然后研究和开发了 Kriging 近似模型，并通过交叉验证方法检验模型的可靠性；另外，基于可靠的 Kriging 模型进行数据挖掘和模型分析；然后给出了近似模型在标准的数学函数以及船型优化问题上的应用实例。第二部分主要是优化算法，包括单目标遗传算法、多目标遗传算法以及基于近似模型的高效全局优化算法，详细介绍了各算法的基本原理、基本流程以及优化测试函数验证。



15008826



第四章 求解器 OPTShip-SJTU 2.0

前面两章已经将船型优化设计流程中最重要的三个技术：船型变换技术、近似技术及最优化技术进行了详细深入的研究，包括他们的基本原理及改进、流程以及开发应用等。当然，船型优化设计流程中还有一项至关重要、不可忽视的技术：水动力性能评估技术。本文所开发的求解器采用粘流方法进行水动力性能评估，直接调用课题组已开发的水动力性能粘流 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU。该求解器是由课题组在开源 OpenFOAM 平台上自主开发的专门解决船舶与海洋结构物水动力性能问题的求解器，已经在船舶阻力性能、耐波性能、操纵性能等预报方面得到广泛应用。同时在此基础上，首次将 overset 重叠网格技术引入 OpenFOAM，形成了 naoe-FOAM-SJTU-os 求解器，能够实现多级物体间的无约束运动，进而应用于船舶与海洋工程中船、桨、舵相互配合以及船舶在波浪上大幅度六自由度运动等问题的粘流 CFD 计算(Shen, 2014; 沈志荣, 2014; 王建华, 2018)。因此，本文对其理论不作过多介绍，但在本章节会介绍如何将其与船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0 进行耦合，实现基于粘流理论的船型优化设计。

基于粘流理论的船型优化设计求解器的实现必须涉及到将这四大关键技术和主要功能模块综合集成。CMHL 中心的水动力性能求解器包括势流求解器 NMShip-SJTU 和粘流求解器 naoe-FOAM-SJTU 都是基于 C++ 语言编写，课题组已经形成了基于势流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 1.0。本博士论文的目标是将 OPTShip-SJTU 1.0 升级为基于粘流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0，并统一采用 C++ 语言编写，包括基于船体 NURBS 的船型变换模块、近似技术模块、优化算法模块以及后处理模块，实现船型自动一体化设计。

4.1 求解器 OPTShip-SJTU 2.0 模块说明

具体地，程序主要由船型变换模块、船体网格自动重生成模块、CFD 计算域网格自动重生成模块、试验设计模块、水动力性能评估模块、近似模型构建模块及优化求解模块组成，模块之间的相互关系如图 4-1：

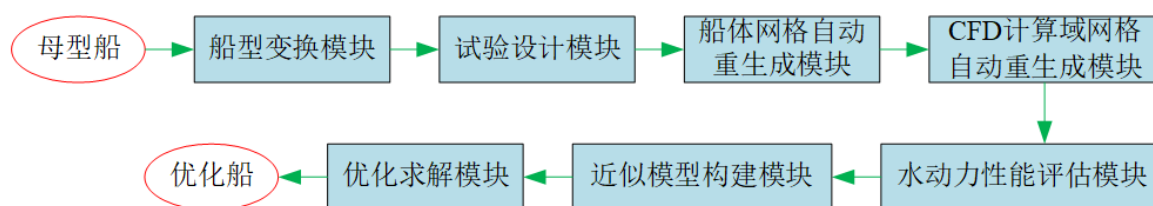


图4-1 求解器的模块组成

Fig.4-1 Modules of solver

船型变换模块的主要功能就是选择合适的船型变换方法对船体曲面进行局部或整体变形,同时计算出新船型的静水力参数,包括湿表面积、排水量、浮心纵向位置、横剖面面积曲线等。区别于求解器 OPTShip-SJTU 1.0,该模块实现了船体 NURBS 曲面的半参数化变形(原理参见第二章的详细介绍)。输入文件包括母型船的 IGES 文件(***.igs 或***.iges)、各船型变换方法对应的变形参数字典文件(*FFDDict*, *RBFDict*, *ShiftDict*) (比如 FFD 方法对应的控制框大小及控制点分布、RBF 方法对应的可动控制点及固定控制点分布、平移法对应的固定站位及变化幅度)以及变形参数的详细定义文件 (*SampleInputDict*) (比如所需新样本船型个数、变形参数的个数、变形参数的变化值等); 输出文件包括新船型的 IGES 文件 (***.igs 或***.iges) 及其静水力参数 (*hydrostatics.dat*)。

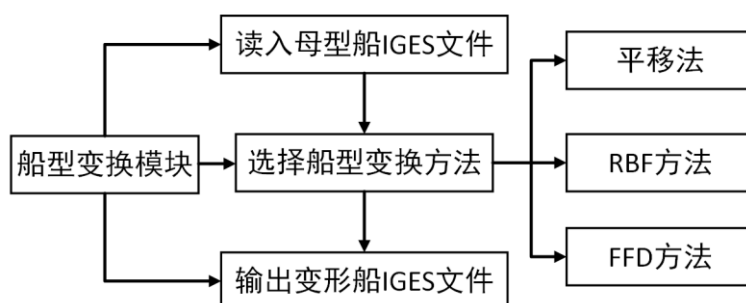


图4-2 船型变换模块

Fig.4-2 Ship modification module

试验设计模块的主要功能是根据设计变量(即变形参数)的范围采用 Sobol 方法或者 OLHS 方法在设计空间中采样,得到系列样本船型。该模块在求解器 OPTShip-SJTU 1.0 的基础上进行了升级和完善:如果所需样本船型个数确定则选用 Sobol 和 OLHS 方法皆可,反之则选择 Sobol 方法较好,后续如果样本船型不够则可继续添加而不破坏样本点在设计空间内整体分布的正交性和均匀性。输入参数主要是设计变



量的范围及所需样本船型的个数 (*SampleInfo*)；输出文件则是所需样本船型对应的设计变量取值 (*SampleInputDict*)，再通过上述船型变换模块即可得到所有样本船型 IGES 文件 (****.igs* 或 ****.iges*)。

船体网格自动重生模块的功能就是自动重生高质量船体曲面三角形网格。输入文件是船型 IGES 文件 (****.igs* 或 ****.iges*)，输出文件是船体 STL 网格文件 (****.stl*) 或 UCD 网格文件 (****.ucd*)。

CFD 计算域网格自动重生模块的功能是自动重生用于 CFD 计算的流场计算域网格。根据前一模块得到的船体 STL 网格文件 (****.stl*)，采用 OpenFOAM 自带的工具 *blockMesh* (生成背景网格) 及 *snappyHexMesh* (局部加密网格、抠船以及添加边界层) 自动生成计算域非结构化网格 (网格信息保存在文件夹 *polyMesh* 中)，网格质量可通过 *paraview* 打开检查。

船体网格自动重生模块及 CFD 计算域网格自动重生模块的目的是为了在船体 NURBS 曲面的半参数化变形以及基于粘流理论进行水动力性能计算之间建立必要的桥梁。它们是求解器 OPTShip-SJTU 2.0 中新添加的功能模块，具体流程如图 4-3，实现了船舶 CAD/CFD 一体化设计。

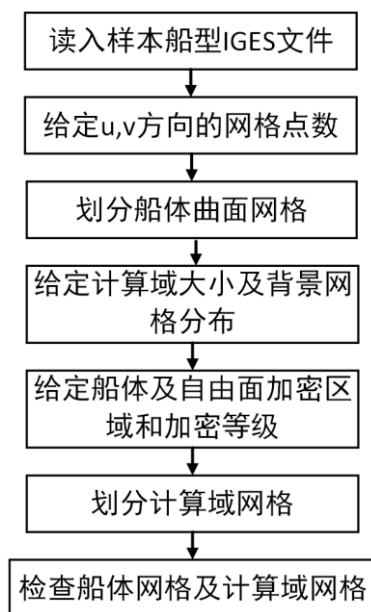


图4-3 船体及计算域网格自动重生模块

Fig.4-3 Automatic regeneration of hull surface and domain grid

水动力性能评估模块的功能顾名思义就是进行船型的水动力性能数值计算。基于 CFD 计算域网格，采用 *naoe-FOAM-SJTU* 粘流求解器可以计算出船舶的阻力值、



船舶运动以及流场信息。本博士论文中水面船舶的数值模拟采用的控制方程为 RANS 方程,湍流模型采用的是目前 CFD 数值计算中广泛应用的湍流模型 SST $k-\omega$ 模型,速度和压力的解耦采用 PISO 算法,自由面的捕捉采用带有人工压缩技术的 VOF 方法;水下潜器的数值模拟采用 DDES 方法,近壁面采用 RANS,在湍流核心区采用 LES,湍流模型为 SST $k-\omega$ 模型,速度和压力的解耦采用的是 PIMPLE 算法,它是 SIMPLE 和 PISO 的混合算法。

近似模型构建模块的主要功能是构建近似模型用于后续优化求解过程中对目标函数或约束条件的评估。输入参数主要是设计变量(试验设计模块得到的系列设计变量取值)、相应的目标函数值(水动力性能评估模块得到的目标水动力性能取值)以及相应的约束条件(包括湿表面积、排水体积等)(这三个参数信息均存放在 *SampleOutputDict*),通过构建近似模型可以快速评估任一新的设计变量对应的目标函数值以及约束条件值,而无需通过上述水动力性能评估模块再进行相对长时间的计算。另外,该模块还可以进行数据挖掘,通过得到的近似模型可进行灵敏度分析、方差分析等,充分分析设计空间的合理性和最优解的可能性。

优化求解模块的主要功能就是在设计空间中通过优化算法得到满足约束条件的最优解,即最优船型。基于得到的近似模型,采用合理的优化算法得到目标函数最优解,并输出相应的设计变量值,再将该值输入船型变换模块得到最优船型,输出最优船型 IGES 文件。

4.2 求解器 OPTShip-SJTU 2.0 流程图

基于粘流理论的船型优化设计的基本过程如图 4-4 所示。从母型船的 IGES 文件处理开始,选择变形方法及变形区域,由此确定相应的变形参数作为设计变量,并给定其上下界,以及需要服从的约束条件;然后选择合适的采样方法采样新船型,生成样本船型,再批量生成样本船型网格及其对应的计算域网格,采用 CFD 方法计算样本船型的目标水动力性能;根据样本船型相应的变形参数值以及目标水动力性能构建二者之间的近似模型;然后根据近似模型优化求解,得到最优解(集),将其反馈给船型变换模块,得到最优船型,最后采用 CFD 方法对优化船型进行数值模拟,分析和验证其优化效果。

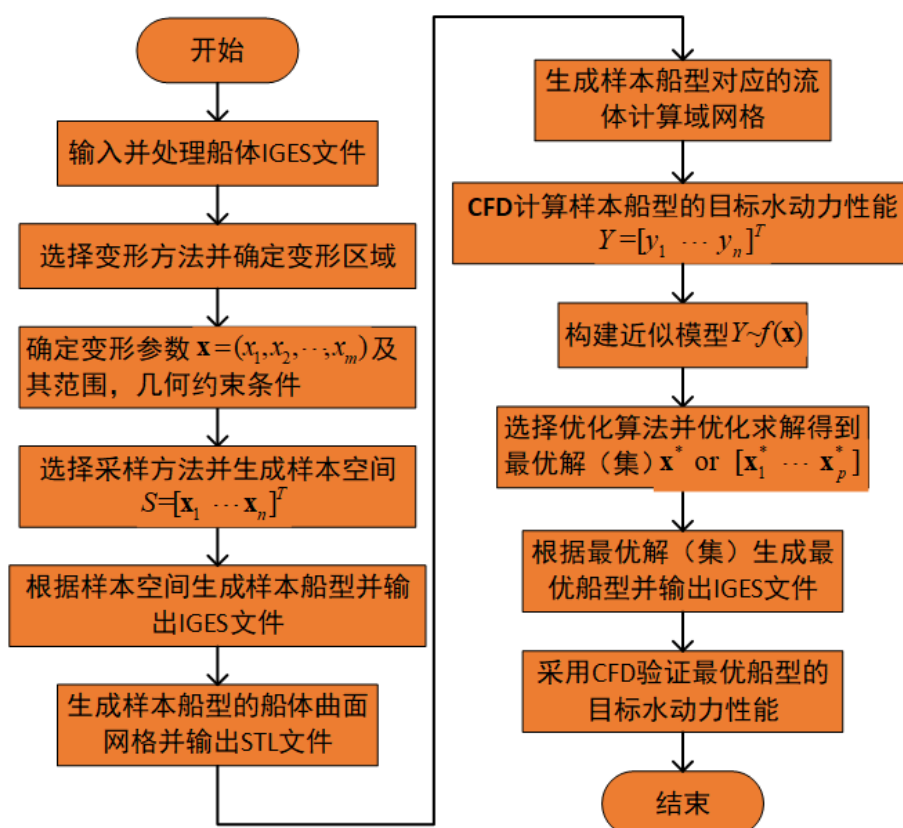


图4-4 基于 CFD 方法的船型优化的一般流程图

Fig.4-4 General flowchart of ship design optimization based on CFD

相较 OPTShip-SJTU 1.0, 求解器 OPTShip-SJTU 2.0 的一大突破是将船舶目标性能近似模型与优化算法进行耦合求解。具体地, 当选择采用 EGO 优化算法时, 整个优化流程较图 4-4 有所不同, 如图 4-5。当构建初始近似模型后, 循环步骤具体如下:

- 1) 构造 EI 函数 (或 EIM 函数), 然后通过优化该函数找出最优解 $\mathbf{x}^*$;
- 2) 将 $\mathbf{x}^*$ 加入整个优化问题的最优解集 $\mathbf{X}$ 中;
- 3) $\mathbf{x}^*$ 作为新增样本点, 同时生成新的样本船型 NURBS 曲面以及其船体网格, 继而得到计算域体网格;
- 4) 采用 CFD 方法评估该新样本船型的目标水动力性能 $\mathbf{y}^*$;
- 5) 更新样本空间为 $S_i = [\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_n \mathbf{x}^*]^T$, (其中, i 表示迭代次数) 重构近似模型;
- 6) 重复 1) ~5), 直到满足迭代终止条件;
- 7) 从 $\mathbf{X}$ 中得到最优解 (集), 并输出船型 IGES 文件。

可见当采用 EGO 方法进行优化时, 无需再进行 CFD 数值验证, 因为每一次迭代所得最优船型都是通过 CFD 数值计算, 而不是用近似模型评估的。

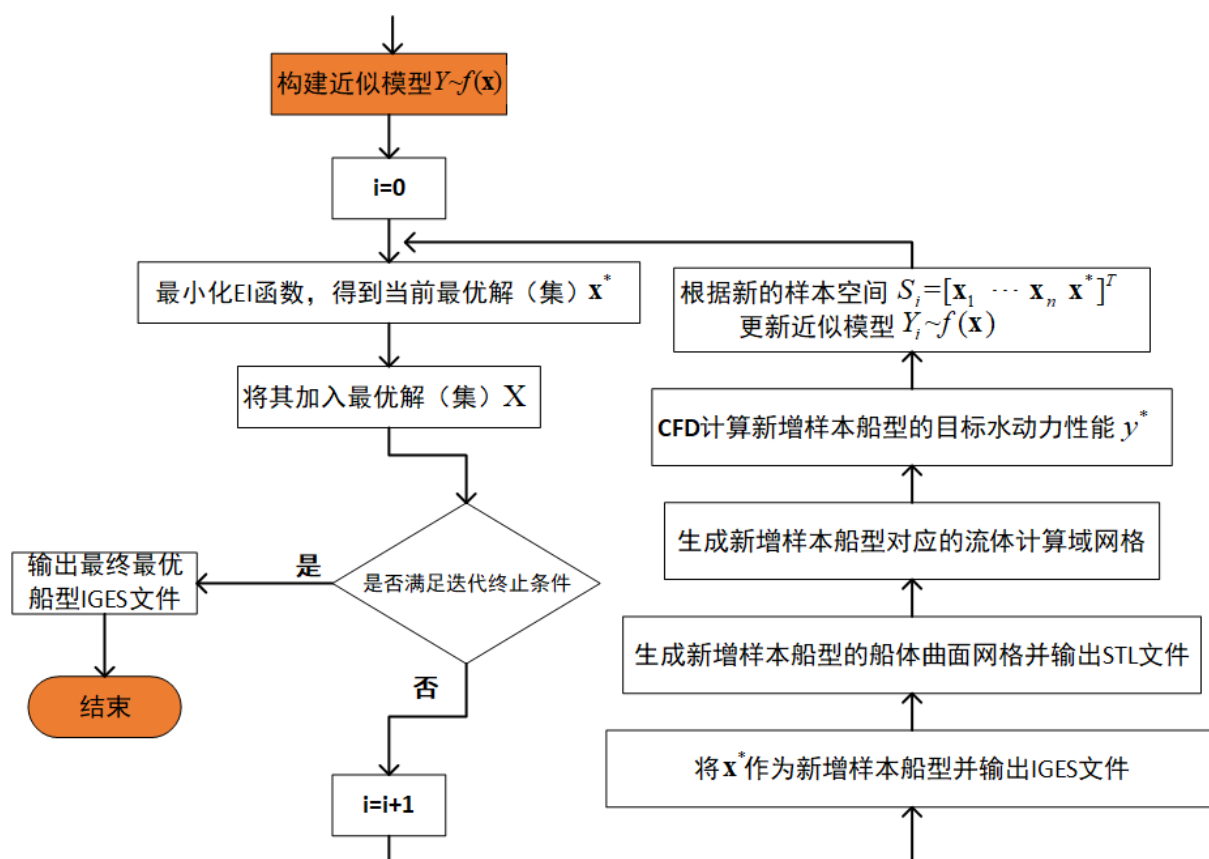


图4-5 基于 EGO 算法的优化求解流程

Fig.4-5 Flowchart of optimization based on EGO method

4.3 求解器 OPTShip-SJTU 2.0 结构图

求解器 OPTShip-SJTU 2.0 的基本结构框架如图 4-6 所示。

母型船以 IGES 文件格式输入，通过 (IGES analysis) 进行处理，提取出控制点坐标、节点向量、权值等重要信息，然后选择合适的方法 (RBF、RBF、Shifting) 进行船型变换（采用 **modifier** 工具），以 IGES 文件格式输出新船型。

新船型的船体网格通过船体曲面网格划分工具(**mapHullMesh**) 得到，然后输入到 (Domain grid)，通过 **blockMesh** 和 **snappyHexMesh** 得到计算域网格。

根据计算域网格，配置好 CFD 所需的其他参数（诸如湍流模型、流体特性、迭代方法配置等），通过 **naoe-FOAM-SJTU** 计算求解，得到目标水动力性能。

样本船型的获取由 **sampling** 工具完成，选择 OLHS 或者 Sobol 方法。通过 **kriging** 构建（初始）近似模型。



优化求解可以选择 SOGA（针对单目标优化求解）、NSGA-II（针对多目标优化求解）以及 EGO（单目标及多目标优化均可求解）。

此外，求解器还包含一些必要的辅助工具，主要是用来求取静水力参数、显示船型三视图、显示 FFD 控制框、提取 RBF 控制点等。

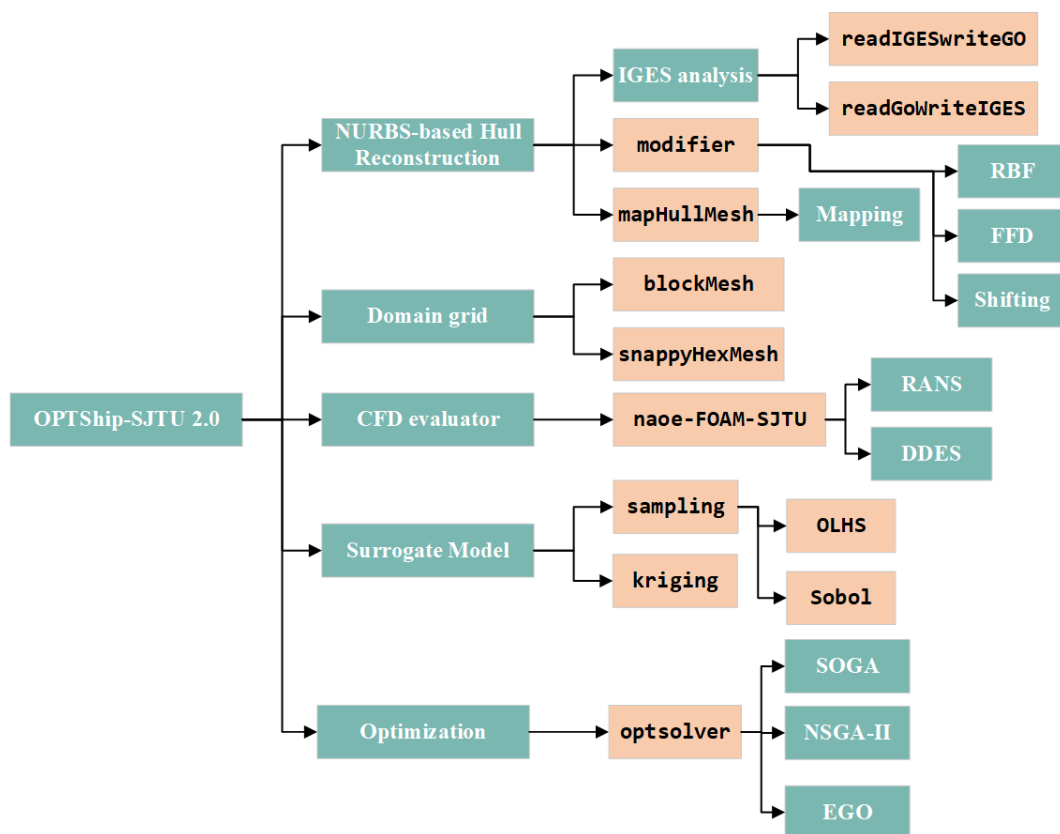


图4-6 OPTShip-SJTU 2.0 求解器框架图

Fig.4-6 Framework of OPTShip-SJTU 2.0

4.4 求解器 OPTShip-SJTU 2.0 标模验证

4.4.1 优化对象基本信息

为了验证求解器 OPTShip-SJTU 2.0 的可靠性和实用性，本小节针对 S60 标准船模进行船型优化，船型变形范围为整船，优化目标为在设计航速 $Fr=0.27$ 下的总阻力值。S60 标模被 ITTC 组织认可的标准船模，已经做过大量的拖曳试验，拥有详尽的试验数据，可供母型船 CFD 数值计算结果进行验证。本章节采用的 Series 60 船型的



船体几何参数以及阻力试验数据均来源于 IIHR (Iowa Institute of Hydraulic Research)。S60 船模的三维几何模型见图 4-7，船体的详细主尺度信息见表 4-1。

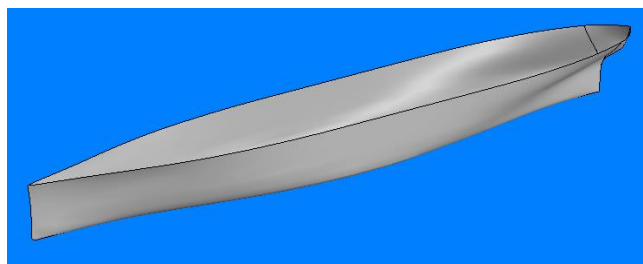


图4-7 S60 船模的几何模型

Fig.4-7 Geometry model of S60

表4-1 S60 模型的几何主尺度

Table 4-1 Main particulars of S60

主尺度	符号和单位	模型尺度
垂线间长	L_{pp} (m)	3.048
最大船宽	B_{WL} (m)	0.406
吃水	T (m)	0.163
型深	D (m)	0.244
排水体积	∇ (m ³)	0.121
湿表面积	S_w (m ²)	1.579
方形系数	C_B	0.60
纵向浮心位置(从首垂线起)	LCB (m)	1.59

4.4.2 母型船的阻力数值计算可靠性验证

根据 ITTC 对 CFD 数值计算的验证和确认分析 (V&V) 指导意见 (王建华, 2018), 网格不确定性分析中判别达到何种收敛形式是评估收敛参数 R_G , 其值的大小由不同密度网格解 (一般至少采用三套不同密度的网格, 粗网格、中等密度网格和密网格) S_i 来确定, 定义如下:

$$\varepsilon_{21} = \hat{S}_2 - \hat{S}_1 \quad (4-1)$$

$$\varepsilon_{32} = \hat{S}_3 - \hat{S}_2 \quad (4-2)$$

$$R_G = \varepsilon_{21} / \varepsilon_{32} \quad (4-3)$$



其中, 下标 $S_i, i=1,2,3$ 代表密网格、中等密度网格和粗网格的结果。不同的 R_G 取值对应于不同的收敛形式:

- 1) 一致性收敛: $0 < R_G < 1$;
- 2) 振荡收敛: $R_G < 0$;
- 3) 发散: $R_G > 1$.

对于第一种情况, 为一致性收敛, 一般采用 Richardson 外插法 (RE) (Roache, P.J, 1998) 来评估网格不确定性 U_G ; 对于第二种振荡收敛的形式, 网格的不确定性是通过振荡的最大值 S_U 和最小值之 S_L 差的平均值, 即:

$$U_G = 1/2(S_U - S_L) \quad (4-4)$$

而第三种情况下, 证明没有达到收敛, 因此也就不需要评估网格不确定性了。因此, 这里采用 RE 方法进行评估网格的不确定性。离散的阶数 P 由下式定义:

$$P = \frac{\ln(1/R_G)}{\ln(r)} \quad (4-5)$$

并且网格收敛指数 (Grid Convergence Index, GCI) 可以通过下式得到:

$$GCI_{ij} = F_s \frac{|e_{ij}|}{r^p - 1} \quad (4-6)$$

其中, F_s 是一个安全参数, 对于采用三套或者以上的网格时 $F_s = 1.25$ 。 e_{ij} 表示 S_i 和 S_j 之间的差别, 网格收敛指数可以表征不同网格对数值结果的影响, 小的 GCI 值表示数值结果对网格的敏感度低。

由于本小节针对 S60 在 $Fr=0.27$ 工况下的总阻力值最小进行船型优化, 故首先对母型船在该航速下的总阻力数值计算进行网格收敛性验证, 确保数值计算的可靠性。本算例采用的数值计算域大小及边界条件设置如图 4-8 所示, 三套计算域网格大小及加密方式一致, 区别在三个方向上相应的网格密度比为 $\sqrt{2}$ (见图 4-9)。得到的不同网格的阻力结果见表 4-2。从表中可以看到, 随着网格的加密, 数值预报的结果同试验值呈现一致收敛的趋势, 从表 4-2 中可以看出, 所有的阻力值都呈现一致收敛, 其中总阻力值的 GCI_{12} (细网格和中等密度网格间的差别) 只有 1.847%, 并且 GCI_{23} 均大于前者, 说明达到中等网格密度后, 数值预报结果受网格的变化影响较小。

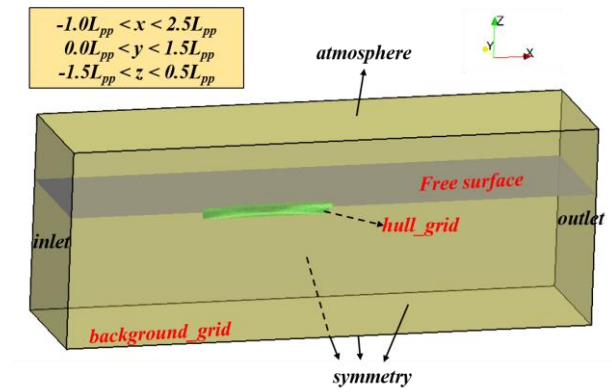


图4-8 计算域大小和边界条件设置

Fig.4-8 The size of the computational domain and boundary conditions

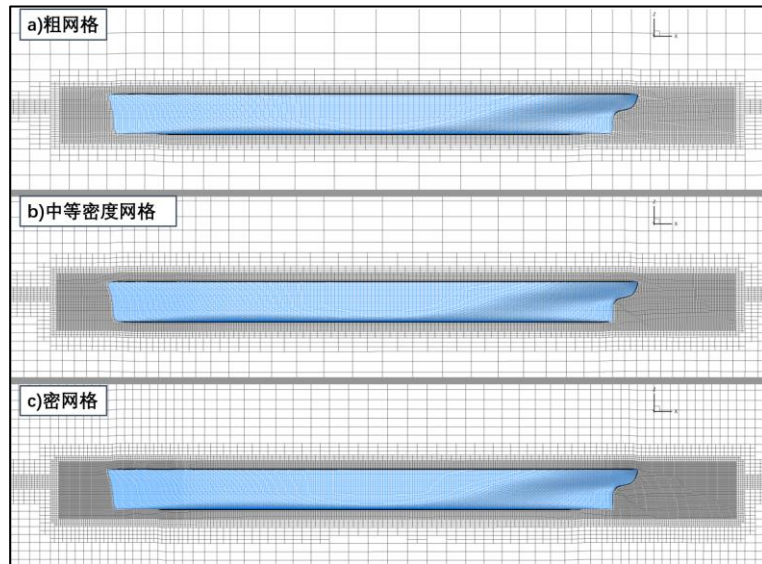


图4-9 S60 船模用于网格不确定性分析的计算网格

Fig.4-9 Computational mesh of S60 model for grid uncertainty analysis

表4-2 S60 在航速 $Fr=0.27$ 下的的网格不确定性分析

Table 4-2 Uncertainty analysis for S60 at $Fr=0.27$

Parameters/N		EFD (D)/N	V&V Study			r_G	$\epsilon_{21}\%S_2$	$U_1\%S_2$	$U_G\%S_2$	$U_{SN}\%S_2$	GCI_{12}	GCI_{23}
			Grid#3 (S_3)	Grid#2 (S_2)	Grid#1 (S_1)							
R_T	Value	8.672	8.242	8.369	8.447	1.414	-0.933	0.048	2.608	2.608	1.847%	3.031%
	E%D	/	-4.958	-3.495	-2.595	/	/	/	/	/	/	/
R_p	Value	/	2.561	2.623	2.660	1.414	-1.433	0.005	3.852	3.852	2.760%	4.591%
R_F	Value	/	5.681	5.746	5.787	1.414	-0.705	0.068	2.043	2.044	1.429%	2.320%



4.4.3 优化设计及结果分析

在优化 S60 船模时采用了 RBF 方法（见图 4-10）以及平移法进行局部和整体的船型变换，采用 OLHS 方法进行初始采样，然后采用 EGO 方法进行更新近似模型并寻优，最终获得最优船型。设计变量的范围见表 4-3，所有变量范围值均为无因次化值，前四个设计变量是平移法中的参数： x_1 对应于前半船的允许变化幅值 α_{1f} ， x_2 对应于前半船的固定站位 α_{2f} ， x_3 对应于后半船的允许变化幅值 α_{1a} ， x_4 对应于后半船的固定站位 α_{2a} ；后三个设计变量是 RBF 方法中的参数： x_5 对应于图 4-10 中点 B 沿船宽方向的移动量， x_6 对应于图 4-10 中点 A 沿船长方向的移动量， x_7 对应于图 4-10 中点 A 沿吃水方向的移动量。图 4-11 示意了基于该变形后 S60 船体首部的 NURBS 控制节点位置变化情况，给定一组船型变量取值为 $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) = (0, 0.25, 0, -0.25, 0.003, 0.015, 0.001)$ ，得到的变形船生成了一个球首，由于 NURBS 控制点首部有加密，当发生位移操作时，仍然能够精细地控制局部形状，并且不会影响其他区域的变形情况。

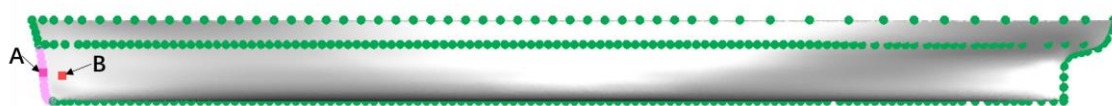


图4-10 RBF 可动点及固定点设置

Fig.4-10 Movable and fixed points distribution on S60 (red points: movable points; green points: all fixed points; pink points: fixed points along the ship width)

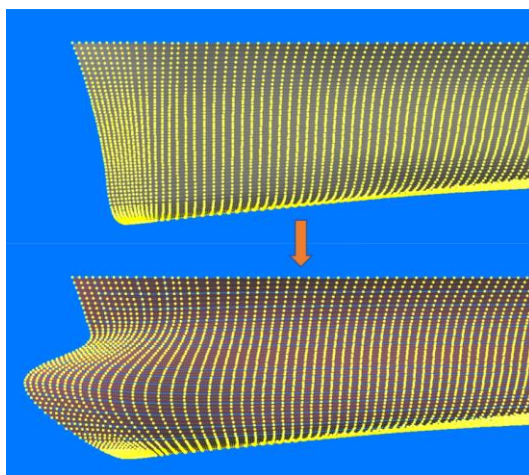


图4-11 S60 船体 NURBS 曲面变形前后的控制节点位置变化

Fig.4-11 The variation of control nodes after deformation for S60 NURBS hull surface



表4-3 设计变量及其范围

Table 4-3 Design variables and their ranges.

设计变量	下界	上界
$x_1(\%L_{pp})$	-0.012	0.012
$x_2(\%L_{pp})$	0.2	0.35
$x_3(\%L_{pp})$	-0.015	0.015
$x_4(\%L_{pp})$	-0.3	-0.1
$x_5(\%L_{pp})$	0.002	0.007
$x_6(\%L_{pp})$	0	0.02
$x_7(\%L_{pp})$	-0.012	0.012

首先采用了 OLHS 方法采样了 64 个初始样本船型,对样本船型采用 RANS 方法求解总阻力值,然后得到 64 组数据,通过 Kriging 构建初始近似模型,然后采用 EGO 方法迭代求解最小阻力值。得到阻力最大降幅优化收敛过程如图 4-12,从图中可以看出经过了 13 次迭代优化已经达到收敛,并且可以得知收敛后得到总阻力最大降幅为 5.06%。值得注意,根据前面对 EGO 方法的介绍它每一次迭代新添加的点都是通过 CFD 进行数值计算的(本文认为是精确计算值),因此这个优化结果并不是单纯通过近似模型优化得来,而是本身就是通过 CFD 数值计算确认的。

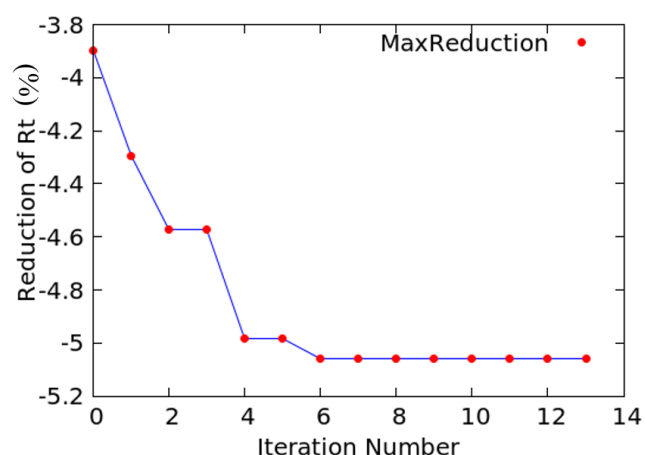


图4-12 S60 基于 EGO 方法的优化收敛曲线

Fig.4-12 Convergency curve of the optimization for S60 based on EGO method

图 4-13 展示的是优化前后的近似模型的交叉验证结果(横轴表示计算值,纵轴表示 Kriging 预测值)。如果 Kriging 能够完全正确表达阻力值和船型变形参数之间的未知隐式关系,则所有点应该全部在斜对角线上,面对实际问题显然很难。从图中可以看出初始近似模型的评估存在误差,如果直接基于此近似模型进行求最优解,则



可能无法找到全局最小值。而经过 EGO 方法迭代 13 次之后，发现新的近似模型在全局最优值附近添加了较多点，从而提高了附近局部精度。

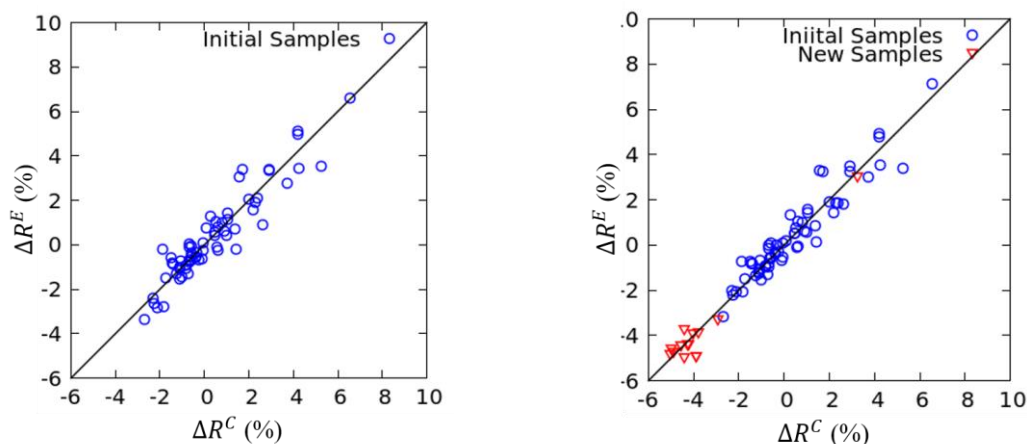


图4-13 近似模型的交叉验证结果（左：初始近似模型；右：13 次迭代之后的近似模型）

Fig.4-13 Cross validation results of Kriging models (left: the initial Kriging model; right: the modified Kriging model after 13 iterations)

图 4-14 展示的是优化船与母型船的船型对比。优化船产生了一个球鼻艏，除此，船前半体的横剖线对比差别不大，而船后半体靠近船中部分稍微变肥，靠近尾部收缩；图 4-15 展示了优化船与母型船的自由面波形对比，图 4-16 和图 4-17 展示的是优化船与母型船的船侧及不同纵剖面的波幅曲线对比，从三幅图中可以看出优化船的兴波较母型船波幅明显降低，从而得知兴波阻力减小；图 4-18 展示的是优化船和母型船周围的涡量场对比，从图中可以看出优化船尾部的涡量场强度降低，从而可以判断优化船的粘压阻力有所降低。

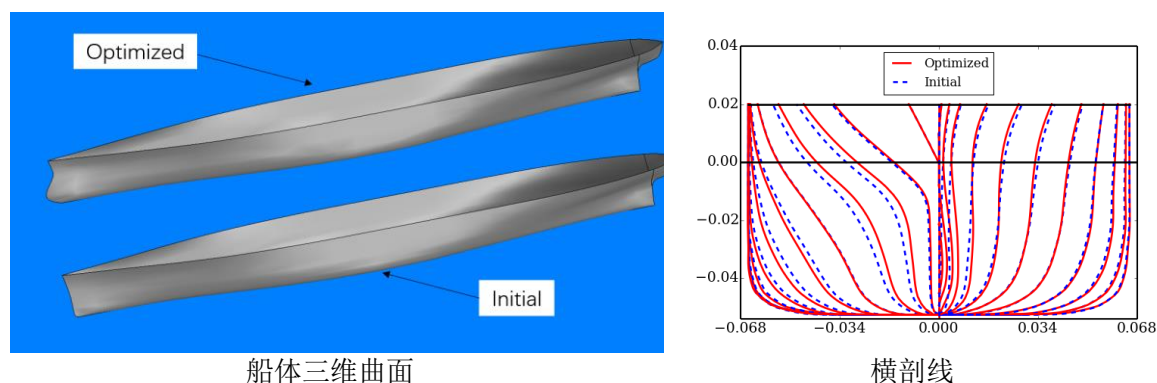


图4-14 优化船与母型船船型对比

Fig.4-14 Comparison of hull form between initial and optimized hulls

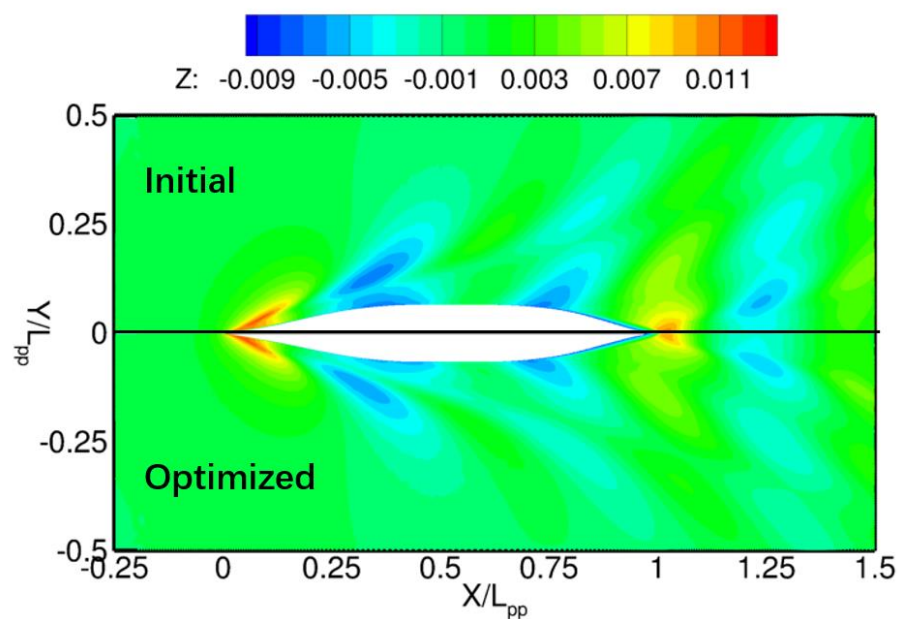


图4-15 S60 母型船与优化船的自由面兴波波形对比

Fig.4-15 Comparison of wave pattern between initial and optimized hulls

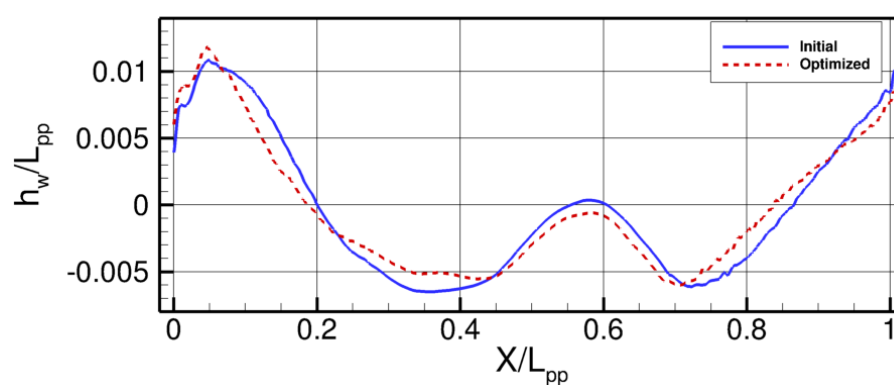


图4-16 优化船与母型船的船体表面波高的比较

Fig.4-16 Comparison of wave profiles between initial and optimized hulls

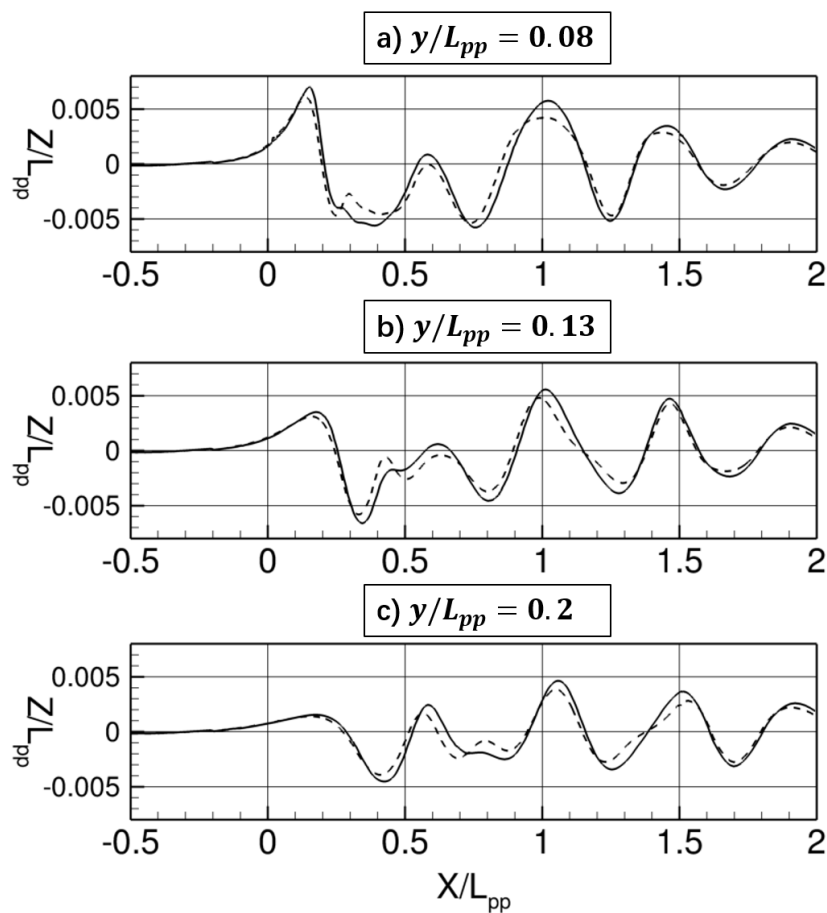


图4-17 $Fr=0.27$ 时船侧纵切波高对比 (实线: 母型船; 虚线: 优化船)

Fig.4-17 Comparison of wave profile (Solid line: initial hull; Dash line: optimized hull)

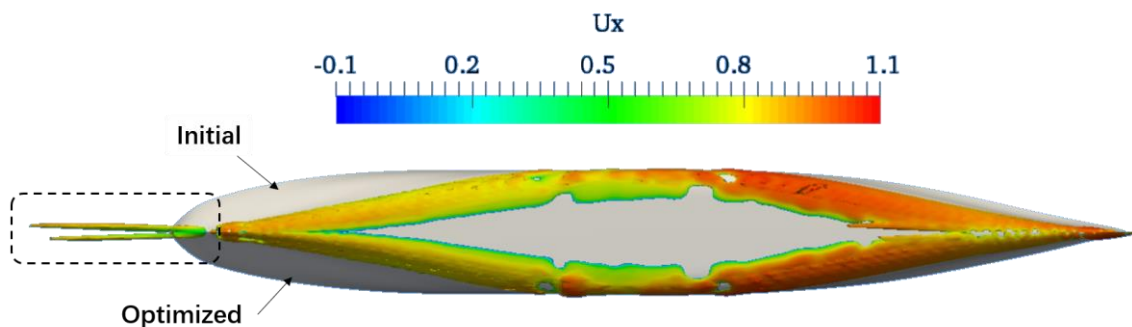


图4-18 优化船与母型船的涡量对比 ($Q=5$)

Fig.4-18 Comparison of vorticity field between initial and optimized hulls ($Q=5$)

本算例虽然只是标模 S60 的单航速阻力优化, 但基于粘流理论的船型优化设计流程已经很清晰, 优化结果可以看出自主开发的基于粘流理论的求解器 OPTShip-



SJTU 2.0 的可靠性。从本例中，可以看出近似模型在数学上是一种“拟合”，“拟合”船舶目标性能与船型变形参数之间的关系，本求解器中采用 EGO 算法实际上是在初始样本船型的基础上进一步探索和开发变形设计空间中最优的样本船型，平衡了近似模型的精度提高和最优样本船型的开发探索。因此新的样本船型的选择得到了充分利用，从而大大降低了计算成本和优化时长。

4.5 本章小结

本章主要介绍了基于粘流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0，主要是四方面的内容：

- 1) 各功能模块的作用、输入输出文件以及各功能模块之间的联系；
- 2) 求解器流程图：包括基于遗传算法的流程图和基于 EGO 优化方法的流程图以及两者的不同之处；
- 3) 求解器程序结构框架：介绍了各功能通过什么工具实现；
- 4) 对求解器进行标模算例验证。



第五章 潜艇的阻力和伴流性能优化实例

5.1 引言

潜艇的快速性包含阻力性能与推进性能。潜艇在水下航行时，由于没有自由面存在，阻力主要包括粘压阻力和摩擦阻力两部分，摩擦阻力的大小主要与艇体湿表面积大小相关，而粘压阻力的大小与艇体的线型密切联系；潜艇的螺旋桨盘面处的伴流场不均匀，会降低螺旋桨的推进效率，而伴流不均匀程度与潜艇的线型设计有很大程度的相关性。通过潜艇的线型优化设计可以优化其阻力性能和桨盘面伴流性能，从而提高其快速性。

本章将对潜艇模型在单航速下的阻力和伴流性能进行优化设计。以总阻力和尾部伴流不均匀度为优化目标，采用 FFD 方法对艇型进行全局几何重构和 EGO 方法进行优化求解，开展了 suboff 的总阻力和伴流性能优化设计，详细分析了优化结果。最后给出了本章小结。

5.2 母型艇阻力及伴流性能数值计算

5.2.1 优化对象基本信息

DARPA 潜艇科技项目（STP）办公室资助了一个专注和定位于帮助未来先进潜艇发展的计算流体力学项目，简称为 DARPA SUBOFF 项目，该项目评估了有无附体的对称艇型的流场，并与试验结果进行了对比，拥有大量详细试验数据。该艇型由美国 DTRC 于 1991 年设计，三维图见图 5-1 以及主尺度见表 5-1。本章节研究的艇型包括轴对称主体和指挥台围壳以及尾翼。

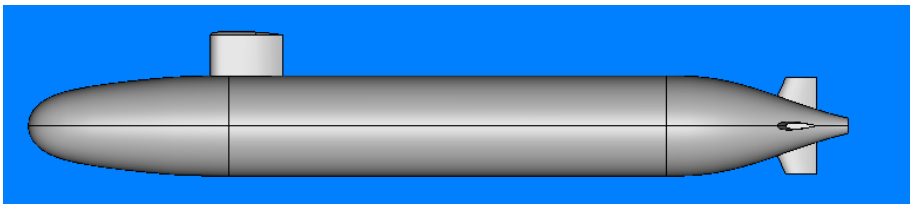


图5-1 Suboff 裸艇的几何模型

Fig.5-1 Geometry model of Suboff bare hull

表5-1 Suboff 模型的几何主尺度

Table 5-1 Main particulars of Suboff

主尺度	符号和单位	模型尺度
全长	L_{oa} (m)	4.356
最大半径	R_{max} (m)	0.254
排水量	∇ (m ³)	0.708
湿表面积	S_w (m ²)	5.998

5.2.2 母型艇不同航速的阻力数值计算

本节对无桨的艇体进行了 CFD 单相流数值计算，计算了不同航速（U=3.051，5.144，6.096，7.161，8.231，9.152m/s）的直航阻力值。虽然艇体关于中纵剖面对称，但本小节对潜艇的数值模拟均采用的是全艇体计算，原因是后续自航推进验算时初始化流场时需采用无桨的艇体计算所得稳定流场初始化，以加快带桨的艇体数值模拟。即便无桨的全艇体数值计算所需的计算时间和资源较半艇体数值模拟可能翻倍，但是这个时间相对于自航推进的数值模拟时间就不在一个量级，自航推进数值模拟如果从静态流场开始计算，即便是使用了超算，一艘艇的模拟时间上可能需要几天，而艇型优化设计问题需要进行数十条甚至数百条的数值计算，这就使得优化问题响应时长太久，而无法应用于实际问题。

图 5-2 展示了无桨全艇体的数值计算域大小以及边界条件设置。由于采用的是重叠网格技术，所以包含两套网格：背景网格以及艇体网格，且网格总量约为 202 万。总阻力的数值结果见表 5-3 所示，表中同时给出了数值结果与相应的试验结果对比情况，其中最大误差为-1.86%，在航速较低和较高时，绝对误差基本在 1%以内。图 5-3 也可以看出数值计算结果与试验结果吻合较好。

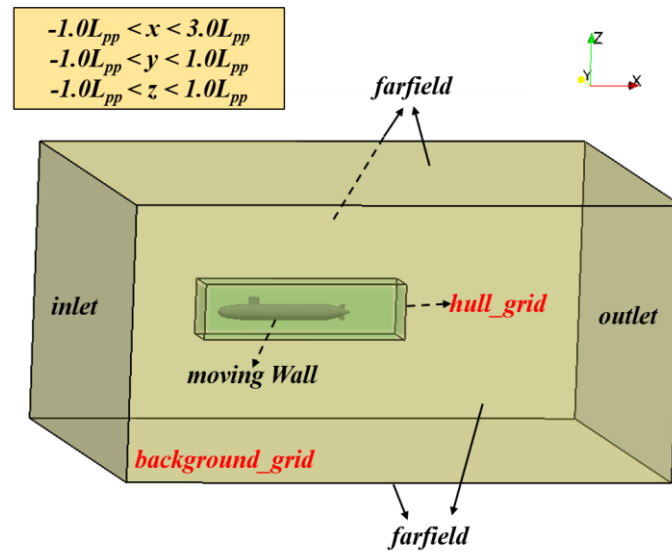


图5-2 计算域大小和边界条件设置

Fig.5-2 The size of the computational domain and boundary conditions

表5-2 不同部位网格量的分布

Table 5-2 Grid distribution of each part

位置	网格量/万	层级
背景网格	78	父级
艇体网格	124	子级
总计	202	--

表5-3 Suboff 不同航速下总阻力数值计算结果

Table 5-3 The numerical results of total resistance for Suboff

航速 (m/s)	阻力(N)/CFD	阻力(N)/EFD	相对误差[%]
3.051	102.4	102.3	0.14
5.144	280.5	283.8	-1.16
6.096	382.5	389.2	-1.72
7.161	516.8	526.6	-1.86
8.231	669.0	675.6	-0.98
9.152	815.7	821.1	-0.66

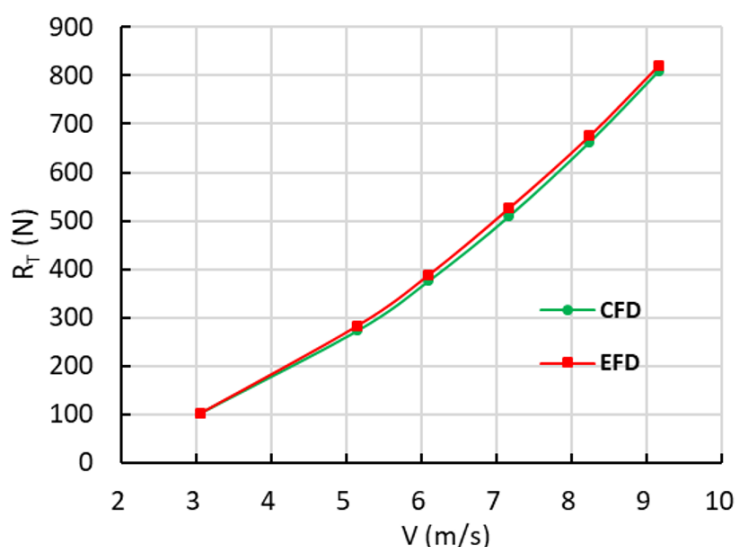


图5-3 Suboff 阻力数值计算结果与试验值对比

Fig.5-3 Comparison of resistance between numerical and test results

5.3 优化设计及结果分析

5.3.1 优化问题定义

本小节旨在优化 Suboff 在航速 $U=2.75\text{m/s}$ 下的总阻力值及尾部桨盘面伴流性能，采用了 FFD 方法（见图 5-4）进行潜艇全局变换（除去尾部及尾翼），采用 Sobol 方法进行初始采样，然后采用 EGO 方法进行更新近似模型并寻优，最终获得最优船型。设计变量的范围见表 5-4，所有变量范围值均为相对于艇长的无因次化值，从表中也可以看出各设计变量所受的隐含约束条件，比如首部长度变化不超过 1%。首先采用了两个 FFD 变形框（见图 5-4a）），围壳位置的变化单独采用一个变形框，目的是不改变艇型主体。 x_1 对应于图 5-4b) 中红色点沿艇长方向的可移动量，用来改变潜艇首部长度； x_2 对应于图 5-4c) 中红色点沿艇长方向的可移动量，用来改变潜艇平行中体长度； x_3 对应于图 5-4d1)、d2)、e1) 和 e2) 中红色点向艇宽方向扩展的可移动量(注：四组变形是对称变形)，用来改变潜艇的最大半径； x_4 对应于图 5-4f) 中红色点沿艇长方向的可移动量，用来改变指挥台围壳的位置。

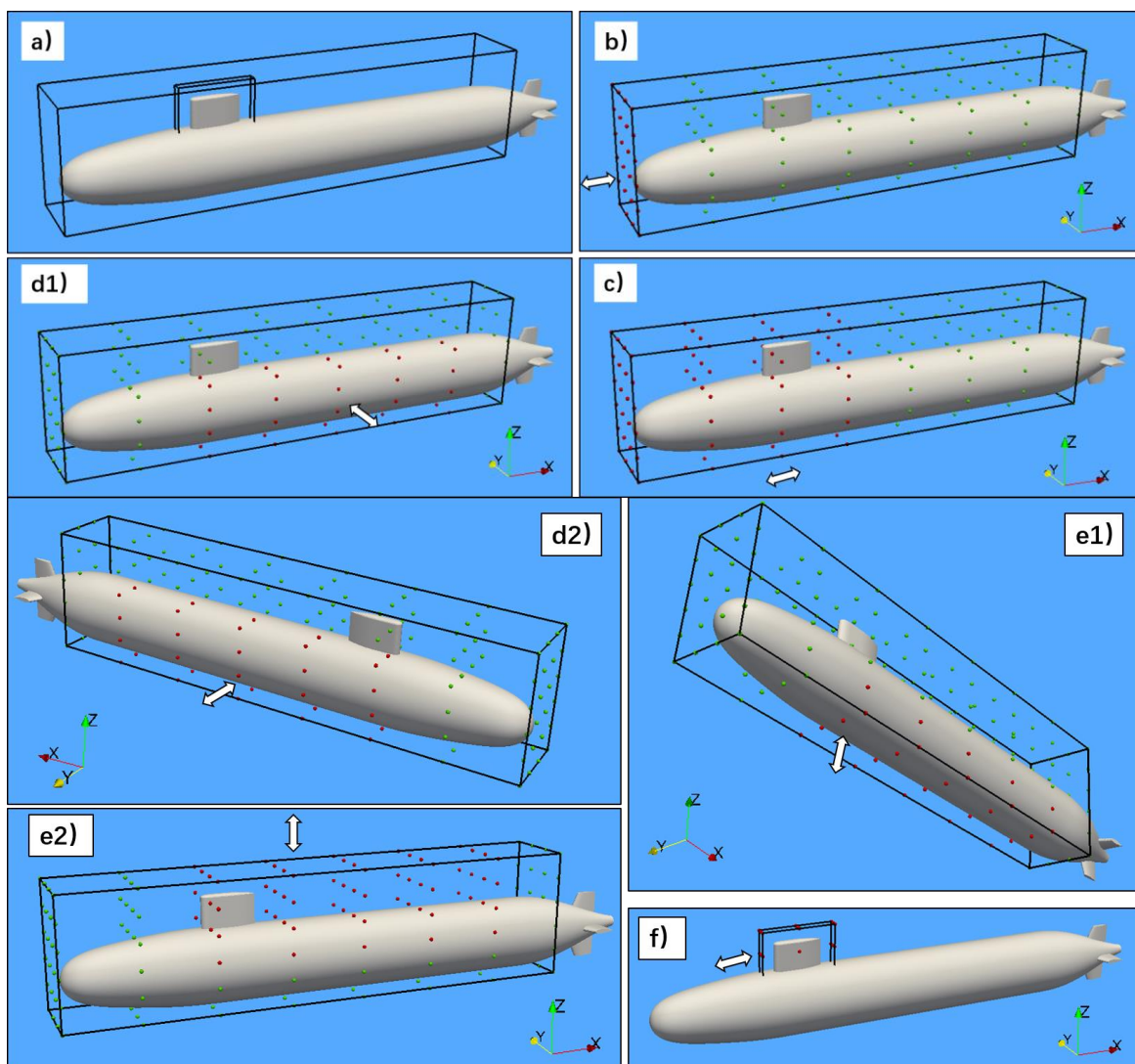


图5-4 基于 FFD 方法的 Suboff 变形

Fig.5-4 Shape deformation of suboff based on FFD method

表5-4 设计变量及其范围

Table 5-4 Design variables and their ranges.

设计变量	下界	上界	备注
$x_1(\%L_{pp})$	-0.01	0.01	控制首部长度变化
$x_2(\%L_{pp})$	-0.01	0.01	控制平行中体长度变化
$x_3(\%L_{pp})$	-0.006	0.006	控制最大半径变化
$x_4(\%L_{pp})$	-0.01	0.01	控制围壳沿长度方向位置变化

目标函数是总阻力 R_t 和桨盘面伴流性能指标 W 。



$$\min \begin{cases} f_{obj}^1 = R_t \\ f_{obj}^2 = W \end{cases} \quad (5-1)$$

其中, W 由 CFD 计算我们可以得到全流场的物理信息, 提取桨盘面处的轴向速度场, 并按照式 (5-2) 得到伴流不均匀度。 W 值越小, 则越均匀, 伴流性能越好。

$$W = \sum_{i=3}^N \sqrt{\frac{1}{M} \frac{\sum_{j=1}^M (U_{xij} - \bar{U}_{xi})^2}{\bar{U}_{xi}^2}} \quad (5-2)$$

其中, $i=3,4,\dots,12$ 表示对应的桨盘面半径 $r = 0.3R, 0.4R, \dots, 1.2R$;

M 表示任一半径的桨盘面周向上的流场单元总数;

U_{xij} 表示半径为 $r = 0.1iR$ 的桨盘面周向上的第 j 个流场单元的轴向速度;

$\bar{U}_{xi}$ 表示半径为 $r = 0.1iR$ 的桨盘面周向上所有流场单元的轴向平均速度。

5.3.2 优化结果及分析

首先采用了 Sobol 方法采样了 60 个初始样本船型, 对样本船型采用 RANS 方法求解总阻力值以及伴流性能值, 然后得到 60 组数据, 通过 Kriging 构建初始近似模型, 然后采用 EGO 方法迭代求解最优性能组合的船型。经过 20 次迭代添加了 20 个新的样本点, 满足了收敛条件, 得到收敛图如图 5-5 所示, 总阻力最大降幅达到 5.127% (图中 Opt3), 伴流均匀度指标最大降幅为 5.997% (图中 Opt1)。然后我们还选择了一个优化样本艇 Opt2, 对这三条典型的优化艇型和母型艇的型线、总阻力值、伴流性能以及其他详细流场信息进行了对比分析。

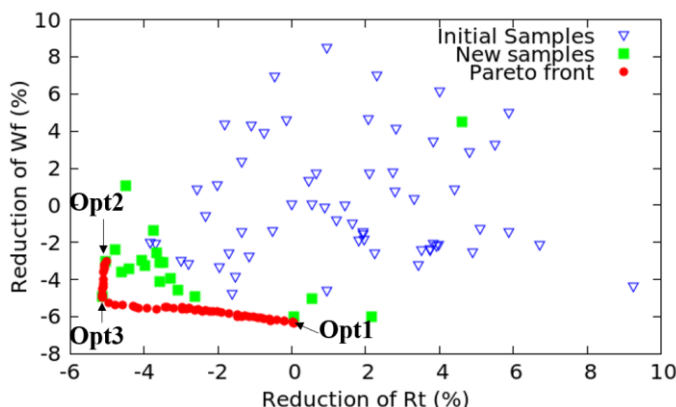


图5-5 基于 EGO 方法添加的样本点集、初始样本点集以及 Pareto 解集

Fig.5-5 Initial samples by Sobol and new samples and Pareto front based on EGO method



从表 5-5 中可以看出,对于阻力变化情况:三条优化艇的压阻力都降低了,Opt2、Opt3 降幅较大;优化艇 Opt2、Opt3 的摩擦阻力也降低了,这个主要是两条艇的湿表面积减小了,而 Opt1 的湿表面积增大了,因此摩擦阻力也增加了 1.811%;综合下来,Opt1 的总阻力值和母型船相当,而 Opt2、Opt3 的总阻力较母型船都有明显降幅。对于伴流性能变化情况:三条优化艇的伴流均匀度指标均有相当的降幅,因此伴流性能均有所改善。

表5-5 优化艇型和母型艇的目标函数对比

Table 5-5 Comparison of objective functions between optimized and initial hulls

	R_p (N)	R_f (N)	R_t (N)	$\Delta R_p\%$	$\Delta R_f\%$	$\Delta R_t\%$	W_f	$\Delta W_f\%$
Initial	21.236	56.386	77.622	/	/	/	0.364	/
Opt1	20.249	57.407	77.656	-4.649	1.811	0.044	0.342	-5.997
Opt2	19.048	54.664	73.712	-10.305	-3.054	-5.038	0.353	-3.031
Opt3	18.637	55.005	73.642	-12.239	-2.448	-5.127	0.346	-4.892

图 5-6 展示了优化艇与母型艇的线型对比,表 5-6 列出了优化艇型对应的变形参数取值以及表 5-7 给出了优化艇型对应的线型关键参数取值。整体上可以看出三条优化艇型较母型艇变短:Opt1 和 Opt2 的首部长度均减小;Opt1 和 Opt2 的指挥台围壳后移,而 Opt3 的指挥台围壳稍微前移;Opt1 的最大半径较母型艇变大,而 Opt2 和 Opt3 的最大半径减小;三条优化艇的平行中体长度都减小了。

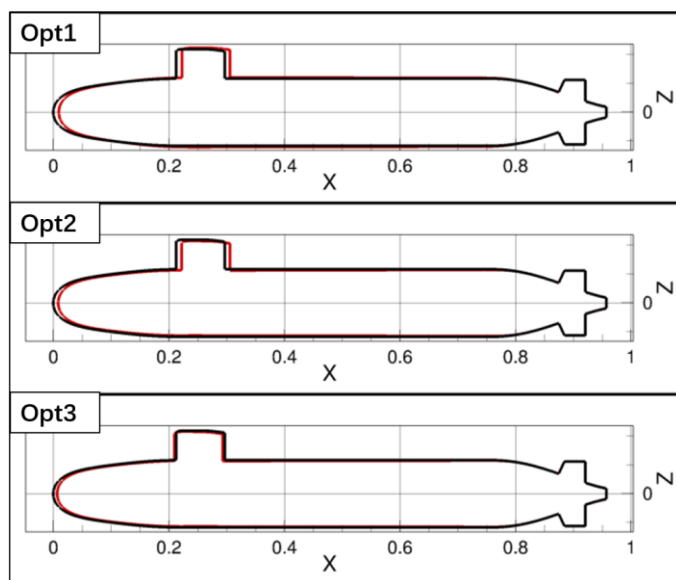


图5-6 优化艇与母型艇外形对比

Fig.5-6 Comparison of shapes between between initial and optimized suboff



表5-6 所选优化艇型对应的设计变量

Table 5-6 Design variables of the optimal hulls

	x_1	x_2	x_3	x_4
Opt1	-0.0030	0.0050	0.0050	0.0050
Opt2	0.0034	0.0056	0.0031	0.0044
Opt3	0.0025	0.0042	0.0027	-0.0070

表5-7 所选优化艇型与母型艇关键参数对比

Table 5-7 Comparison of the key parameters of the optimal hulls and the initial hull

	首部长度	围壳起始位置	最大半径	平行中体长度
Initial	0.233	0.212	0.0583	0.512
Opt1	0.228	0.222	0.0599	0.507
Opt2	0.230	0.222	0.0565	0.506
Opt3	0.230	0.209	0.0570	0.508

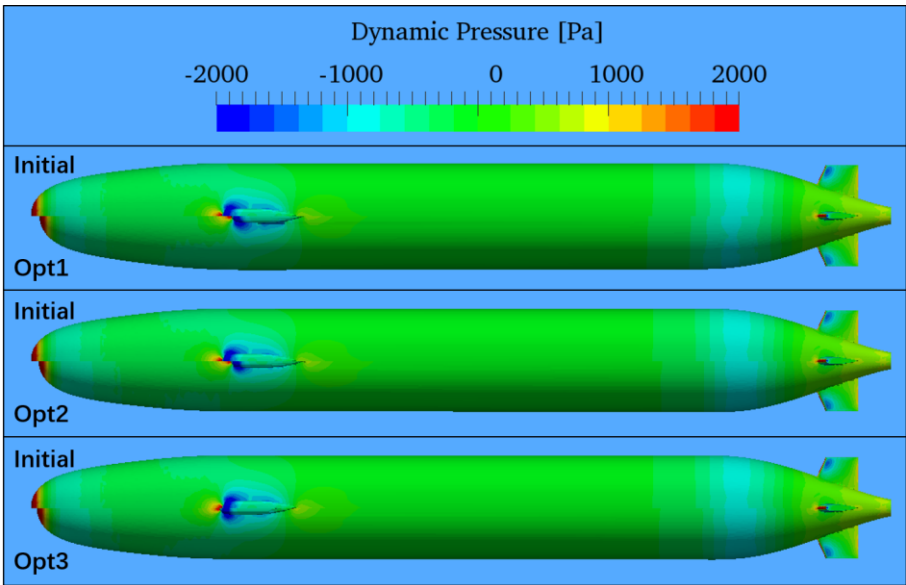


图5-7 Suboff 母型艇与优化艇的压力分布对比

Fig.5-7 Comparison of pressure distribution between initial and optimized hulls

图 5-7 展示了优化艇与母型艇的表面压力对比，从图中可以看出优化艇与母型艇的压力分布主要区别在指挥台围壳附近：Opt1 较母型艇压力分布变化不明显，只是因为围壳位置后移，围壳附近的高低压分布相应后移；而 Opt2 和 Opt3 较母型艇的高低压面积减小，表明了两条优化艇的压阻力降低。图 5-8 和图 5-9 展示了优化艇



与母型艇的涡量对比情况，可以明显看出 Opt1-3 围壳往后的涡量强度明显减弱了，可见粘压阻力减小。图 5-10 展示了优化艇与母型艇的桨盘面伴流分布情况对比，优化艇的桨盘面伴流分布明显更加均匀，低速区峰值和面积减小，Opt1 尤为明显，这和表 5-5 中结果吻合。

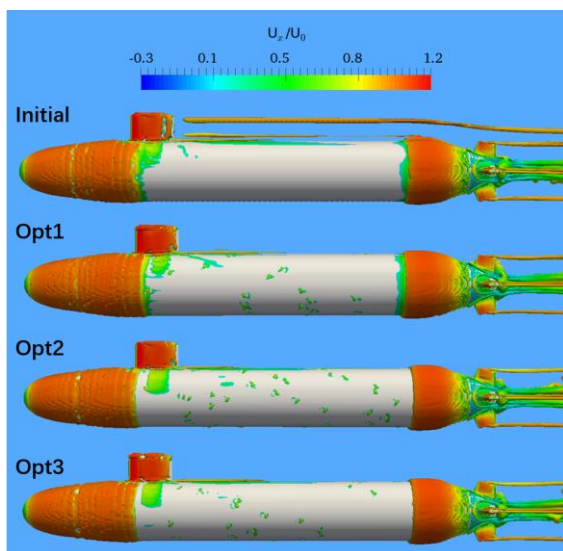


图5-8 优化艇与母型艇的涡量对比 (Q=10)

Fig.5-8 Comparison of vorticity field between initial and optimized hulls (Q=10)

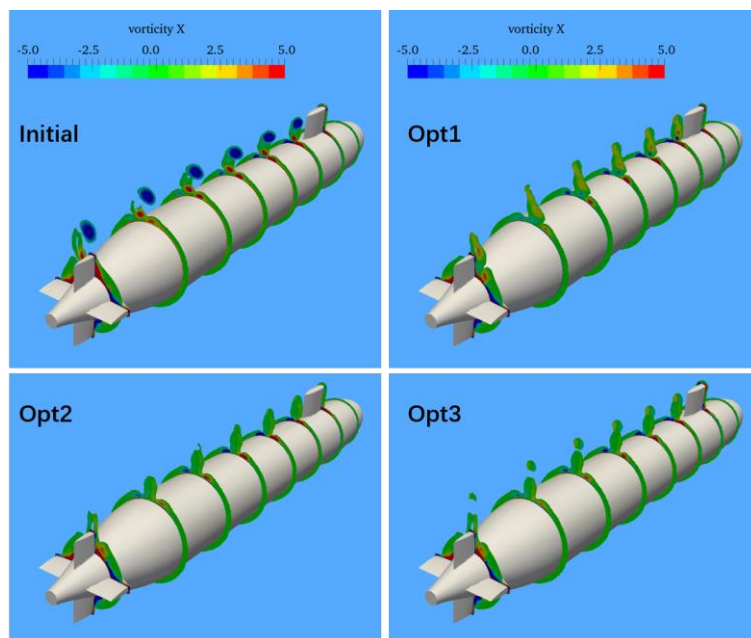


图5-9 优化艇与母型艇的尾部 x 方向涡量对比

Fig.5-9 Comparison of vorticity field along x-axis between initial and optimized hulls

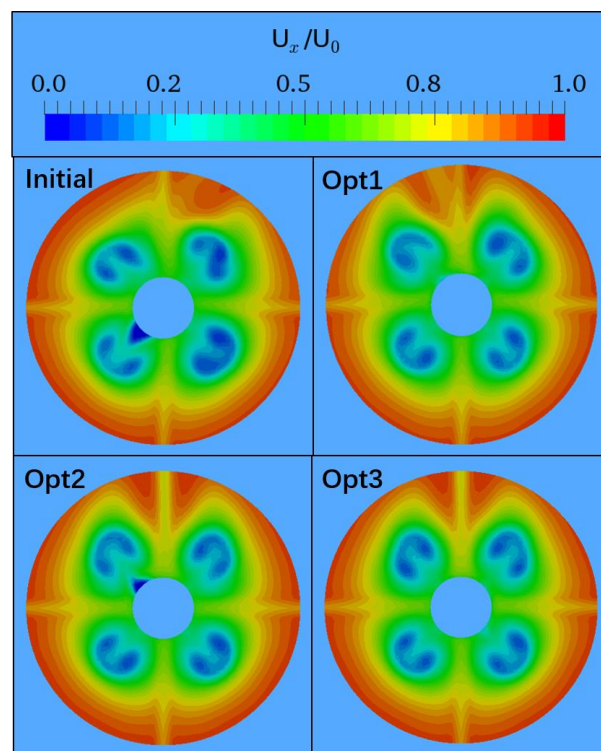


图5-10 桨盘面处伴流场的比较

Fig.5-10 Comparison of wake profile at disk

综上所述，经过优化设计，Suboff 母型艇阻力性能最大提升 5.127%，从初步的灵敏度分析也可以看出，单一参数的变形对于阻力的影响相对较小，选取了多个变形参数后阻力性能得到明显提升，并且可以得知首部较长、较宽些对于阻力性能更优，可以有效降低兴波阻力，而尾部线型朝着船尾提前收缩，能够有效降低涡量强度，从而减小粘压阻力；而对于伴流性能，尾部线型的改变对其影响显著，提前收缩有利于改善尾部伴流，且优化船尾部线型趋于一致。

5.4 优化艇和母型艇自航推进对比验证

为了更好地验证优化结果的可靠性，对优化前后的艇型 (Initial, Opt1, Opt2, Opt3) 进行了带桨的自航推进数值模拟，带桨几何模型如图 5-11，四艘艇型采用相同的螺旋桨型号 INSEAN E1619，参数见表 5-8。

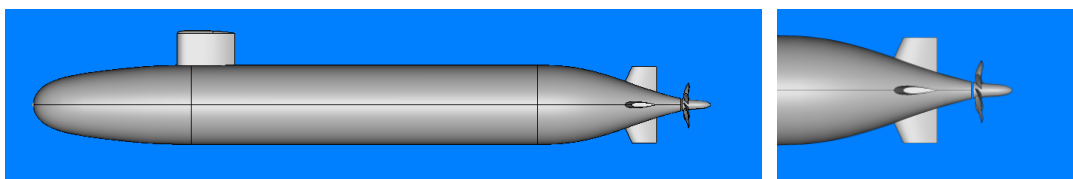


图5-11 Suboff 带桨的几何模型

Fig.5-11 Geometry model of Suboff with the propeller

表5-8 INSEAN E1619 主要参数

Table 5-8 INSEAN E1619 main propeller parameters

	INSEAN E1619
桨叶数	7
直径 [mm]	485
毂径比	0.226
旋向	右旋

静水自航推进数值模拟的初始流场是通过裸艇体拖航数值模拟的最终稳定流场映射过来的，这样能够给出了较为实际的边界层流场和初始流动状态，以此加速自航推进的计算。数值计算中给定相同的螺旋桨转速 $n = 7.3 \text{ rps}$ 。

四艘带桨艇型的数值模拟采用完全相同的重叠网格布置，包括计算域大小以及加密方式。计算域包含三套网格背景网格：背景网格、艇体网格和螺旋桨网格。不同的网格布置如图 5-12 和图 5-13 所示。图 5-12 显示了数值计算的计算域大小以及边界条件。图 5-14 中绿色代表艇体网格，紫色代表螺旋桨网格，橙色代表螺旋桨网格，各网格间的重叠部分通过插值计算。整个系统网格总量约为 503.8 万，不同部位网格量大致分布如表 5-9 所示。

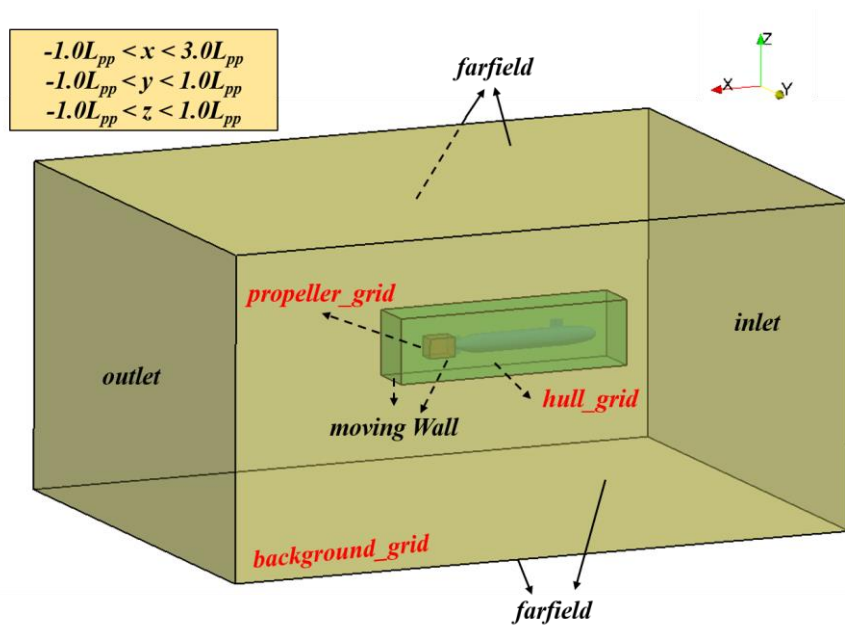


图5-12 计算域大小及边界条件

Fig.5-12 The size of computational domain and the boundary conditions

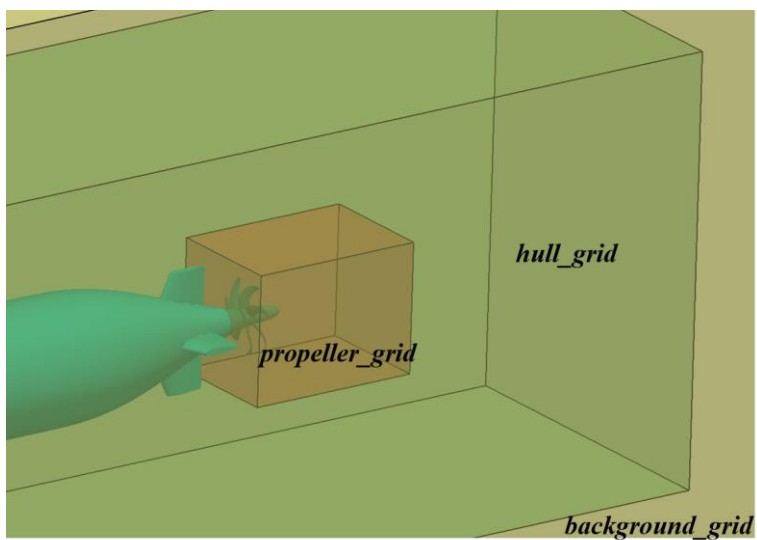


图5-13 重叠网格布局

Fig.5-13 The layout of overset grid system

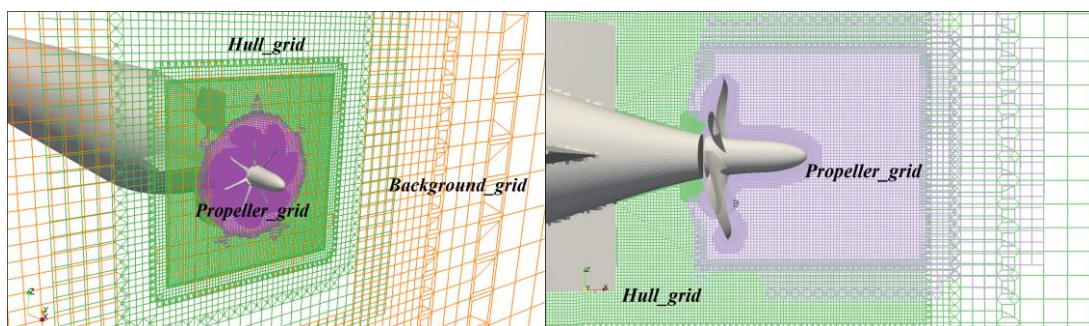


图5-14 Suboff 自航推进的重叠网格局部图

Fig.5-14 Details of overset grid system for self-propelled Suboff

表5-9 不同部位网格量的分布

Table 5-9 Grid distribution of each part

位置	网格量/万	层级
背景网格	78	父级
艇体网格	124	子级
螺旋桨网格	301	子级
总计	503	--

表 5-10 给出了在给定螺旋桨转速情况下，四艘艇型自航前进所受的总阻力情况。对比表 5-5 显示的裸艇体阻力情况，得出以下结果：1）整体上带桨的优化艇型和母型艇各阻力成分较裸艇体相应增加；2）带桨优化艇型较母型艇的压阻力成分降低的程度有所减弱，摩擦阻力降低的程度基本不变，因而总阻力成分降低的程度也有所减弱；3）带桨的优化艇型中 Opt2 较带桨母型艇的的总阻力降幅最大，Opt3 次之，这可能和艇体与螺旋桨相互作用导致桨盘面伴流场变化有关，而 Opt1 有 0.382% 的增幅。因此，对无桨的裸艇体进行总阻力和伴流性能综合优化具有实际意义。

图 5-15 展示了桨盘面的伴流场情况，从图中可以看出优化艇型与母型艇的桨盘面伴流场整体上变化不大，主要原因可能是在优化设计中对艇体去流段以及尾翼构型未进行变形考虑，但由于艇体与螺旋桨的相互作用，与裸艇体尾部伴流场区别较大。未来可以考虑带桨优化，可以更好地去改善桨盘面伴流场，改善快速性。



表5-10 优化艇型和母型艇自航推进工况下的阻力对比

Table 5-10 Comparison of resistance between self-propelled optimized and initial hulls

	R_p (N)	R_t (N)	R_i (N)	$\Delta R_p\%$	$\Delta R_t\%$	$\Delta R_i\%$
Initial	34.049	57.110	91.158	/	/	/
Opt1	33.413	58.093	91.507	-1.867	1.722	0.382
Opt2	31.520	55.394	86.913	-7.428	-3.005	-4.657
Opt3	31.509	55.678	87.187	-7.458	-2.507	-4.356

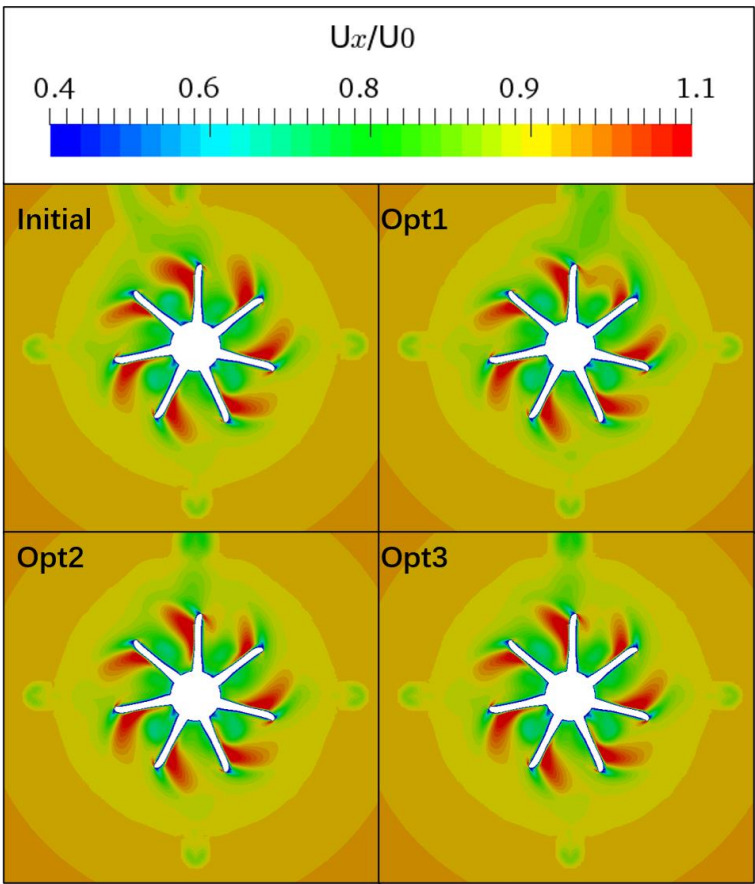


图5-15 优化艇和母型艇在自航推进工况下的桨盘面伴流分布

Fig.5-15 Wake distribution at disk between self-propelled optimized and initial hulls

5.5 本章小结

本章节验证了所开发的船型优化求解器在水下潜器的构型设计的实用性。主要对水下潜艇 Suboff 标模进行了全局形状变形，从而综合优化其总阻力和伴流性能，水下潜艇的形状优化对于改善其快速性至关重要，并且其阻力成分是摩擦阻力和粘



压阻力。因此采用 CFD 进行性能评估显得非常有优势，可以充分考虑粘性以及提取所要关注的局部流场信息。再次验证了多目标 EGO 算法寻优加快了基于 CFD 技术的船型优化时长。



15008826



第六章 高速双体船的多航速阻力性能多目标优化

6.1 引言

水面船舶的阻力性能优化是船舶型线设计需要考虑的最重要水动力性能之一。船舶在实际运营中一般是在一个航速范围内航行，而船舶在不同航速下的阻力性能不同，因此，进行多个航速的总阻力优化具有实际工程意义。针对高速双体船而言，一方面，其阻力性能主要是和片体的形状以及片体间距有关。片体的形状直接影响双体船的压阻力，而片体间距大小影响片体之间的流动，进而产生或强或弱的流动干扰，对兴波阻力和粘性阻力都有影响；另一方面，在不同航速下，双体船的片体间的干扰也不同，有时可能在一个航速下片体间距对双体船阻力是有利干扰，在另一个航速下片体又可能是不利干扰。

本章节以标模 S60 双体船为优化对象，以两个高航速下的总阻力为优化目标，采用 FFD 方法进行 S60 双体船的片体 NURBS 曲面变形，同时考虑片体间距变化，采用 NSGA-II 算法进行优化求解，开展了 S60 双体船的首部形状和片体间距的优化设计，详细分析了优化船型的阻力、自由面波形、兴波干扰、船体压力分布以及沿片体中纵剖面上的交叉流情况等。最后给出了本章小结。

6.2 S60 双体船的多航速总阻力数值计算

6.2.1 母型船的基本信息

本小节船模为 S60 双体船，该船模来自文献(Souto-Iglesias et al., 2012)，文献给出了该双体船在不同间距下的试验结果和数值结果。母型船取片体间距为 0.971m ($s/L_{pp} = 0.3884$)，并将母型船命名为 S60_C3，其船模几何模型见图 6-1，单片体的主尺度信息见表 6-1。

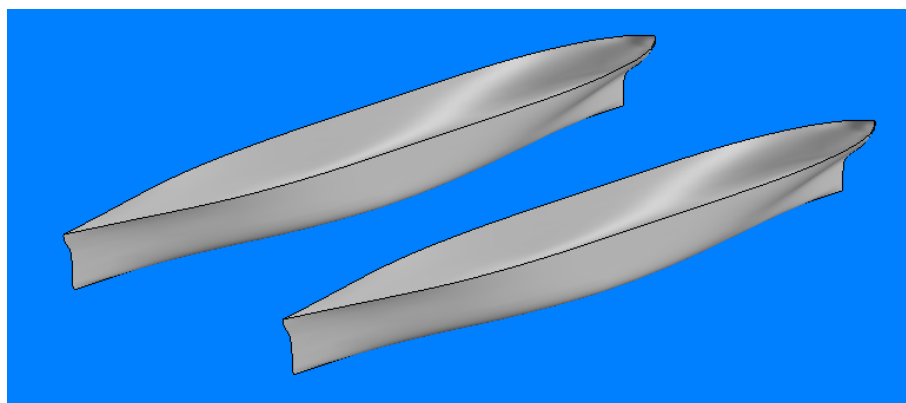


图6-1 S60_C3 双体船模的几何模型

Fig.6-1 Geometry model of S60_C3 catamaran

表6-1 S60 单体船模型的几何主尺度

Table 6-1 Main particulars of S60 monohull

主尺度	符号和单位	模型尺度
垂线间长	L_{pp} (m)	2.5
最大船宽	B_{WL} (m)	0.333
吃水	T (m)	0.133
排水量	∇ (m ³)	0.0664
湿表面积	S_w (m ²)	1.062
方形系数	C_B	0.6

6.2.2 母型船的阻力数值计算可靠性验证

6.2.2.1 数值模型和计算设置

母型船的数值计算包括对 S60 单体船和 S60_C3 双体船计算,由于单体和双体船都是关于中纵剖面对称,计算所采用的计算域均为半船计算域,这样可以很大程度减少计算成本和时间,网格生成采用 OpenFOAM 自带的前处理工具 blockMesh 和 snappyHexMesh 生成,前者用作背景网格生成,后者则进行船体周围网格贴合、局部加密以及添加边界层等步骤。计算域大小和网格信息如图 6-2 和图 6-3,双体船和单体船采用相同的加密区域和等级,单体船中等网格量约为 260 万,双体船中等网格量约为 250 万。边界层如图 6-4 所示,保证 $y^+ > 30$,边界条件设置参见图 6-2 所示。

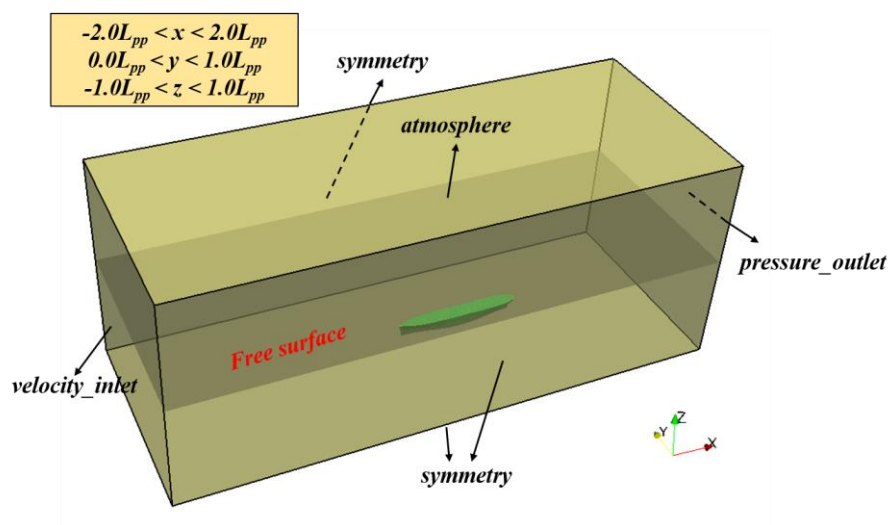


图6-2 计算域大小和边界条件设置

Fig.6-2 The size of the computational domain and boundary conditions

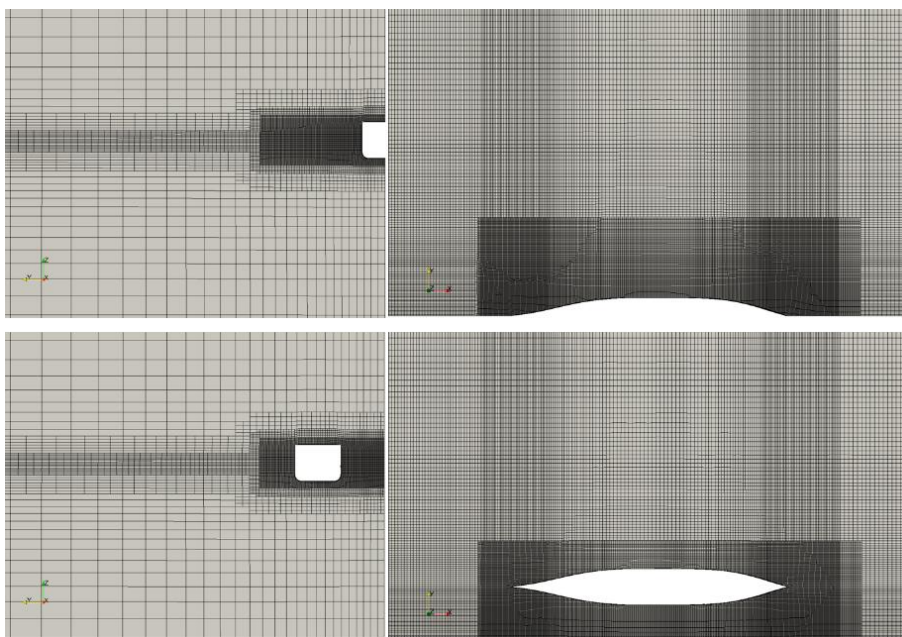


图6-3 S60 单体和 S60_C3 双体船对应的网格加密方式

Fig.6-3 The grids and refinements of the computational domain for the S60 monohull and S60_C3 catamaran models

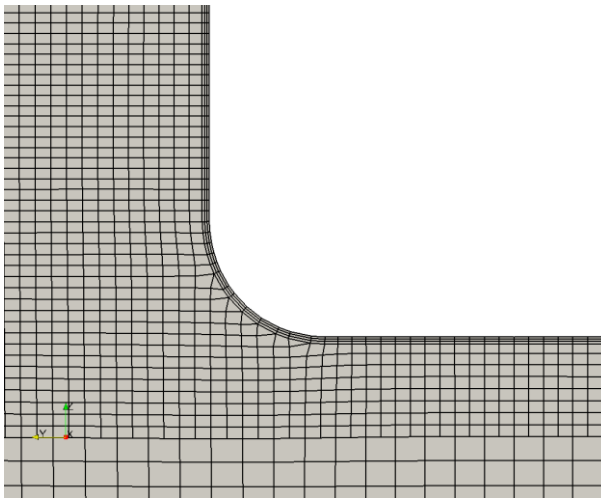


图6-4 网格边界层

Fig.6-4 The boundary layer of grids

6.2.2.2 网格收敛性验证

对 S60 单体船和 S60_C3 双体船模在 $Fr=0.3\sim0.55$ 下分别进行了网格收敛验证及数值不确定性计算。采用了三套不同密度（网格密度比 $\sqrt{2}$ ）的网格进行阻力数值计算，单体船和双体船的网格收敛性验证结果分别见表 6-2 和表 6-3。从 R_G 的值可以看出，数值计算均呈现一致收敛趋势，从网格收敛指数 $GCI_{12} < GCI_{23}$ 可见，网格密度达到中等网格密度后，数值计算结果受网格密度的影响很小了，因此后续样本船型数值计算均采用中等网格。

表6-2 S60 单体模型的网格收敛结果

Table 6-2 Grid convergence results for S60 monohull model

Fr	R _T _EFD/N	<i>r_G</i>	<i>R_G</i>	<i>e</i> ₂₁ % <i>S</i> ₂	<i>U</i> ₁ % <i>S</i> ₂	<i>U</i> _G % <i>S</i> ₂	<i>U</i> _{SN} % <i>S</i> ₂	<i>GCI</i> ₁₂	<i>GCI</i> ₂₃
0.30	5.744	1.414	0.484	0.506	0.078	0.538	0.543	0.598%	1.228%
0.35	8.643	1.414	0.613	0.823	0.080	2.270	2.272	1.646%	2.661%
0.40	17.089	1.414	0.592	0.775	0.048	1.817	1.818	1.414%	2.372%
0.45	27.282	1.414	0.457	0.905	0.043	1.051	1.052	0.959%	2.082%
0.50	36.375	1.414	0.535	0.763	0.054	1.111	1.112	1.108%	2.053%
0.55	43.890	1.414	0.578	1.139	0.045	2.392	2.392	1.969%	3.370%



表6-3 S60_C3 双体船模的网格收敛结果

Table 6-3 Grid convergence results for S60_C3 catamaran model

Fr	R _T _EFD/N	r _G	R _G	e ₂₁ %S ₂	U _I %S ₂	U _G %S ₂	U _{SN} %S ₂	GCI ₁₂	GCI ₂₃
0.30	12.061	1.414	0.614	0.734	0.078	2.030	2.032	1.468%	2.375%
0.35	17.217	1.414	0.735	0.553	0.080	3.503	3.504	1.931%	2.611%
0.40	43.32	1.414	0.673	0.611	0.048	2.556	2.556	1.584%	2.338%
0.45	67.002	1.414	0.735	0.245	0.043	1.547	1.548	0.851%	1.155%
0.50	81.635	1.414	0.640	0.880	0.054	2.943	2.943	1.978%	3.061%
0.55	93.234	1.414	0.694	0.956	0.045	4.581	4.581	2.732%	3.900%

6.2.2.3 阻力数值结果分析

基于中等网格划分，将 S60 单体及 S60_C3 双体船在 6 个航速下的总阻力与试验值进行了对比，见图 6-5。从图中可以看出对于 S60 单体船，相对较低航速时误差较大，可以从以下角度合理解释：根据文献（Farkas 等，2017），在试验测量时，总阻力值是以千克计量。对于 Fr=0.3，总阻力值仅 0.5855kg，对于这么小的一个值，很小的一个不确定性都可能导致一个相对大的误差。而对于 S60_C3 双体船而言，数值计算和试验值误差整体相对都小很多，尤其对于即将优化的两个航速 Fr=0.4 和 0.45，误差在 3%以内。

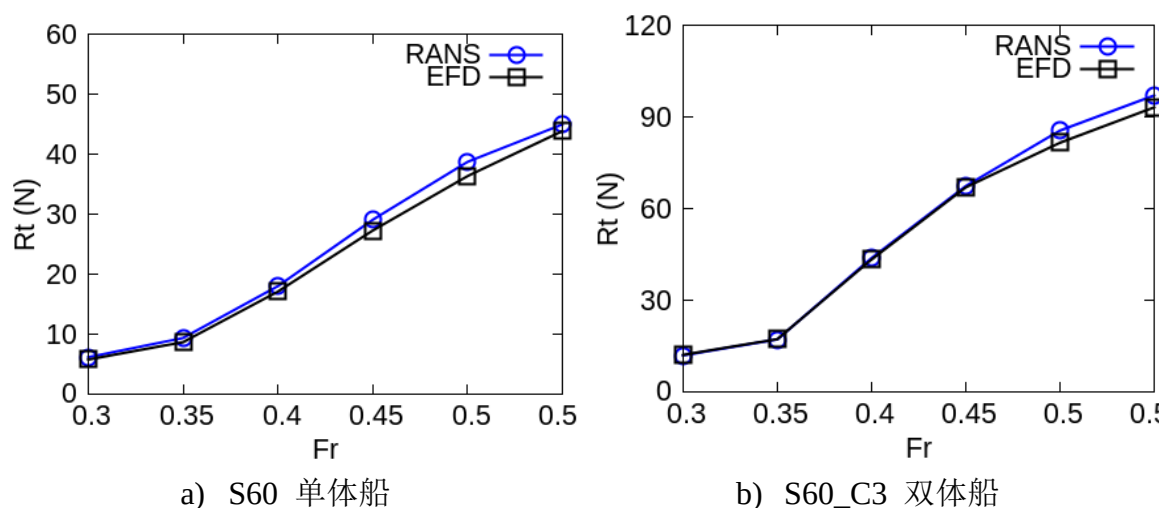


图6-5 S60 单体船 (a) 和 S60_C3 双体船 (b) 阻力和误差结果

Fig.6-5 The resistance values and errors of the S60 monohull (a) and S60_C3 catamaran (b) model



6.3 S60 双体船的优化设计及结果分析

6.3.1 优化问题定义

本章节采用 FFD 方法对单片体的首部进行变形，FFD 方法的控制框大小和控制节点分布如图 6-6 所示，红色的点可以同时分别沿着 x, y, z 轴方向移动，从而改变片体首长度、宽度和高度；而绿色的点保持不动。因此，三个优化变量就是红色的点的三个方向的移动量。另外，还有个很重要的船型参数：片体间距作为第四个设计变量。它们的变量范围见表 6-4。图 6-7 展示了基于 FFD 方法的片体变形示意图。假设给定一组值 $(x_1, x_2, x_3) = (-0.06, -0.05, -0.03)$ ，要得到变形片体，具体变形过程：首先沿船长方向移动图 6-7a) 的红色点，移动距离为 0.06，得到如图 6-7b) 所示的变形船体，然后沿着船宽方向移动图 6-7b) 的红色点，移动距离为 0.05，得到如图 6-7c) 所示的变形船体，最后沿着吃水方向移动图 6-7c) 的红色点，移动距离为 0.03，最终得到如图 6-7d) 的变形片体。

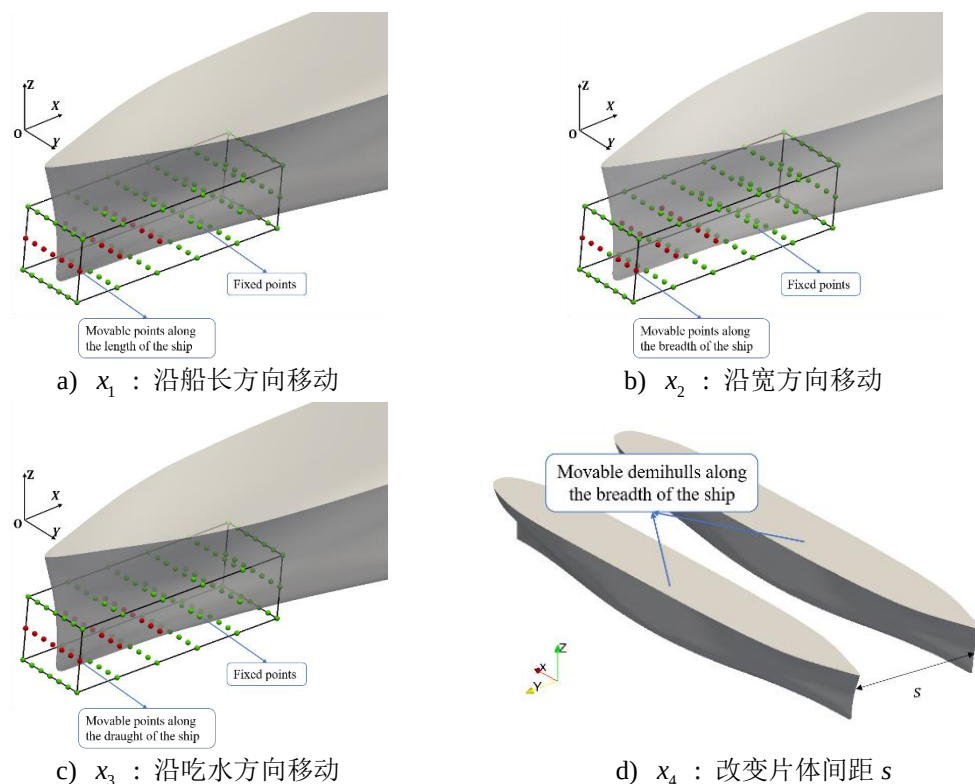


图6-6 基于 FFD 方法的控制框大小及控制节点分布

Fig.6-6 The control points distribution in the lattice based on FFD method

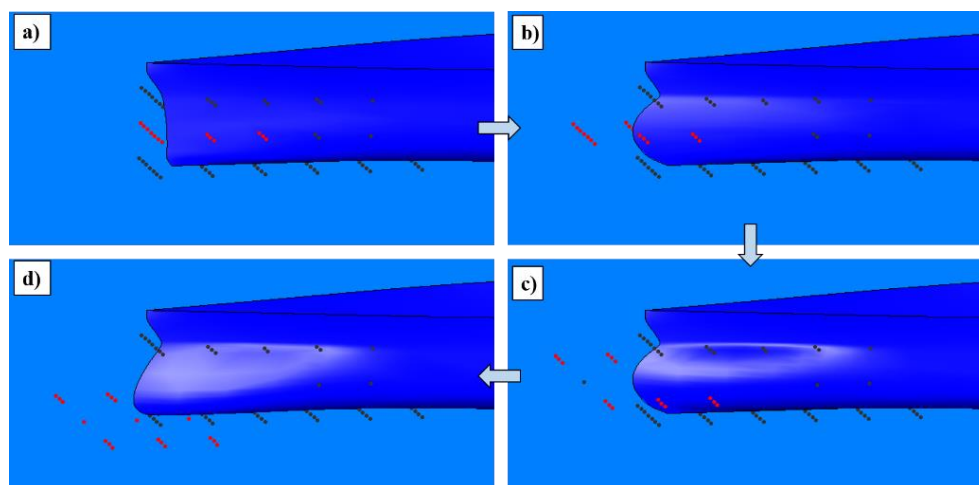


图6-7 基于 FFD 方法变形示意图

Fig.6-7 A diagram of deformation based on FFD method

表6-4 设计变量及其范围

Table 6-4 Design variables and their ranges.

设计变量	下界	上界
$x_1(\%L_{pp})$	-0.12	0
$x_2(\%L_{pp})$	-0.05	0
$x_3(\%L_{pp})$	-0.03	0.01
$x_4(\%L_{pp})$	0.1	0.25

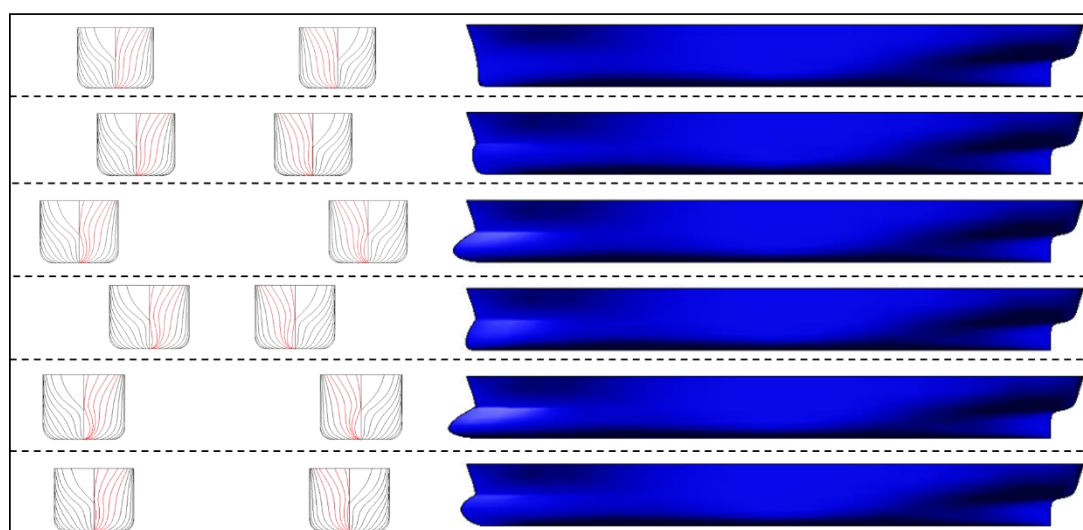


图6-8 母型船与五个样本船型对比

Fig.6-8 A diagram of the initial catamaran and sample catamaran designs



根据 FFD 变形及设计变量范围，得到几个样本船型如图 6-8 所示，可见该变形设计可以得到非常不同的样本船型。

根据 Farkas 等（2017）的研究结果，发现母型船在 $Fr=0.45$ 航速下的阻力最大，片体间兴波干扰最为严重。因此，本章节选择目标函数有两个：在 $Fr=0.45$ 航速下的总阻力值以及邻近航速 $Fr=0.4$ 的总阻力值；对排水体积进行一定的约束。

$$\min \begin{cases} f_{obj}^1 = R_t, Fr=0.4 \\ f_{obj}^2 = R_t, Fr=0.45 \end{cases} \quad \text{Subject to: } \nabla \geq 99\% \nabla_0 \quad (6-1)$$

6.3.2 近似模型精度评估

本章节样本船型的选择采用 Sobol 算法，为了使得构建的近似模型精度满足要求（预报误差尽可能小），最终选择了 61 个样本船型进行数值计算，获取对应的目标阻力性能，形成 61 组样本船型数据，基于这 61 组样本数据构建了两个航速下的总阻力性能的近似模型，额外采用 OLHS 方法采用了 10 个样本船型进行验证近似模型的精度，数值计算得到的阻力值与通过近似模型得到的阻力近似值的差别作为误差判定指标。最大的绝对误差、平均绝对误差以及均方根都列在了表 6-5 中。基于误差分析，由于均方根和平均误差相对较小，近似模型整体上能够表达设计变量（船型变换参数）与目标函数（两个航速下的阻力值）的近似关系。

表6-5 近似模型误差分析

Table 6-5 Error analysis of approximation models.

	Rt (Fr=0.4)	Rt (Fr=0.45)
Max ABS (error)	4.05%	3.14%
Avg ABS (error)	1.61%	1.15%
root MSE	2.21%	2.03%

6.3.3 灵敏度分析

根据近似模型，本章节进行了一个初步的敏感度分析，表达各船型变形参数变量对两个航速下的总阻力的影响程度，见图 6-9。从图中可看出 $Fr=0.4$ 和 0.45 的总阻力分别有一个较大的可能的减小量，约 16%和 15%。同时可以看出片体间距对总阻力的影响较大。在 $Fr=0.4$ 的情况下，片体间距的影响不是单调变化的。可以看出增大或减小间距都有可能有利于双体船阻力性能；而在 $Fr=0.45$ 的情况下，片体间距对阻力的影响是单调变化的，间距越大，阻力降幅越大。跟间距的影响相比，其他三个



设计变量（片体形状参数）对阻力的影响相对较小。球鼻艏变长对阻力性能更好。当然设计变量的相互作用对阻力的影响也会对阻力有很大并且复杂的影响。

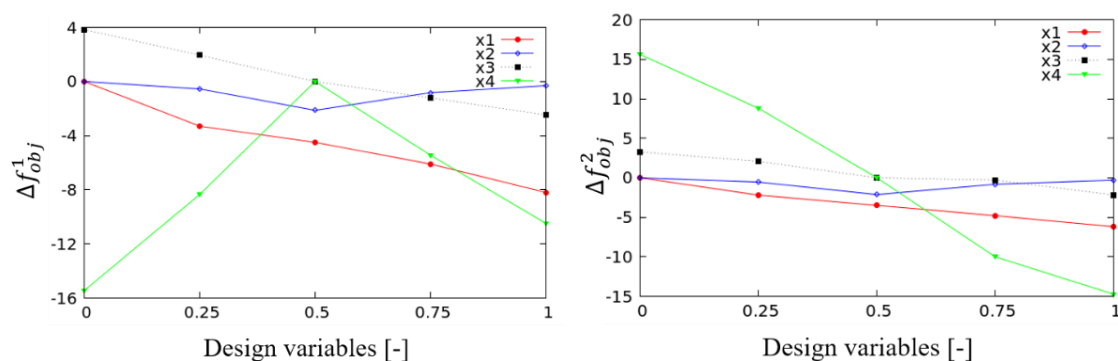


图6-9 设计变量的敏感度分析

Fig.6-9 Sensitivity analysis of the design variables

6.3.4 优化算法参数设置

基于可靠的近似模型，本节采用 NSGA-II 算法寻找两个航速下的最小总阻力。详细的算法参数展示在表 6-6 中。

表6-6 NSGA-II 算法的参数设置

Table 6-6 The parameters setup of NSGA-II

参数	取值
种群大小	50
最大迭代次数	400
交叉率	0.8
变异率	0.3
Pareto 分数	0.3

6.3.5 优化船和母型船对比分析

根据 NSGA-II 算法得到了本节问题的最优解，或称之为 Pareto 解集（见图 6-10）。每一个红色的点代表一个优化解，对应一个优化双体船。从 Pareto 前沿选择了 10 个优化解，对应 10 条优化双体船通过 RANS 求解器 naoe-FOAM-SJTU 数值求解得到了其总阻力计算值如图中绿色点，这些 CFD 计算值整体上也和基于近似模型得到的 Pareto 前沿趋势一致。

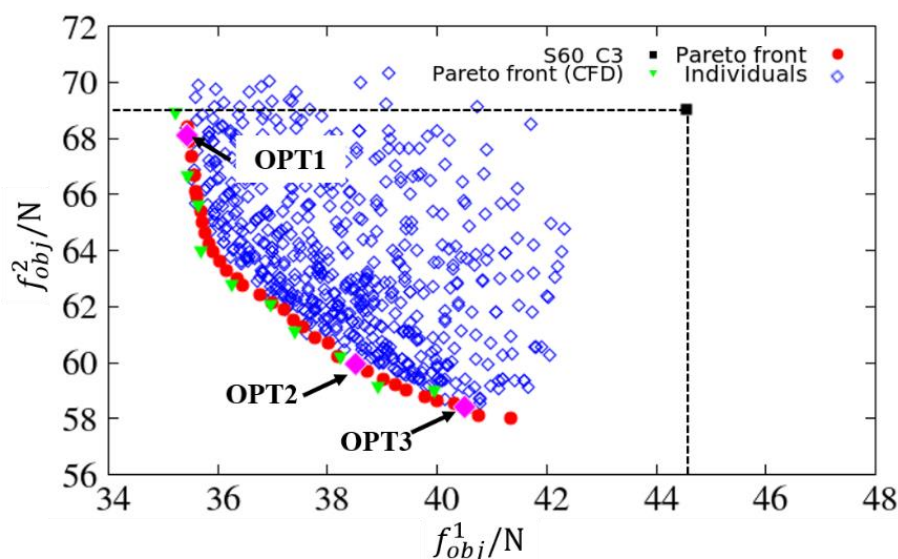


图6-10 Pareto 解集及选择的用于进一步对比分析的三个优化船型

Fig.6-10 The Pareto front and the three catamaran candidates selected for further numerical simulations

为了进一步验证分析优化解，选择了 10 条优化船中比较有代表性的三条船：OPT1,OPT2,OPT3 进行后续详细分析考证。三条优化船的片体形状和片体间距见图 6-11，并将其与母型船 S60_C3 进行了比较。可以看出，OPT1-3 都拥有较长的球鼻艏，并且 OPT2-3 的首部较宽，OPT1 的首部微微上翘。OPT2-3 的片体间距较母型船 S60_C3 变大，而 OPT1 片体间距较小。优化船的详细船型变换参数值见表 6-8。三条优化船的湿表面积和排水量的变化列在表 6-9 中，可以看出所有优化船的湿表面积和排水量都增加了，并且满足约束条件。

三条优化船通过基于 RANS 方法的 naoe-FOAM-SJTU 求解器直接数值模拟。表 6-7 展示了优化船基于 CFD 和 Kriging 模型的总阻力预报结果对比。根据误差结果，基于 Kriging 的预报结果跟基于 CFD 的数值预报结果整体吻合较好，最大误差为 2.695%。表 6-8 展示了母型船和优化船的总阻力对比结果。在 $Fr=0.4$ 时，OPT1 的总阻力有最大的降幅 20.52%，其他两条双体船也有明显降幅（12.60%和 10.84%）；在 $Fr=0.45$ 时，OPT2 和 OPT3 的总阻力有明显降幅（分别为 15.00%和 13.11%），而 OPT1 的总阻力有稍微的增大。

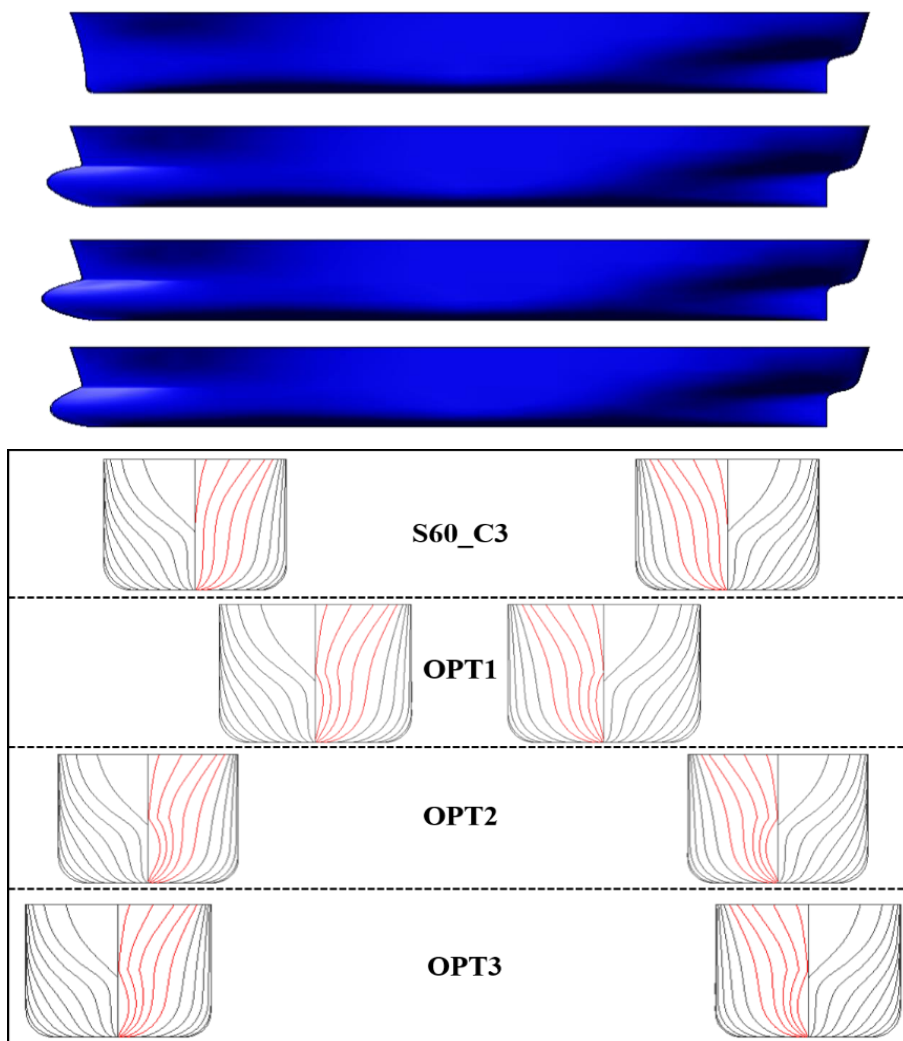


图6-11 优化船型与母型船片体形状及片体间距对比

Fig.6-11 Comparison of the initial and the optimal (OPT1, OPT2, OPT3) catamarans, including the demihull shapes and separations

表6-7 优化船基于 CFD 和 Kriging 计算的阻力结果对比

Table 6-7 Comparison of the resistance results for optimal hulls between CFD and Kriging

/	Rt (Fr=0.4)			Rt (Fr=0.45)		
	CFD	Kriging	Error (%)	CFD	Kriging	Error (%)
OPT1	35.418	35.533	0.323	69.126	68.058	-1.546
OPT2	38.946	38.435	-1.311	58.661	59.807	1.953
OPT3	39.730	40.434	1.771	59.965	58.349	-2.695



表6-8 所选优化船型对应的设计变量和目标函数值

Table 6-8 Summary of the optimal results, including design variables and objective functions.

/	设计变量 (无因次化)				Rt (Fr=0.4)		Rt (Fr=0.45)	
	x	y	z	s	Value [N]	$\Delta f_{obj}^1(\%)$	Value [N]	$\Delta f_{obj}^2(\%)$
S60_C3			/		44.559	/	69.011	/
OPT1	-0.102	0.000	0.010	0.100	35.418	-20.52	69.126	0.17
OPT2	-0.116	-0.024	0.002	0.233	38.946	-12.60	58.661	-15.00
OPT3	-0.093	-0.024	-0.007	0.249	39.730	-10.84	59.965	-13.11

表6-9 所选优化船型与母型船几何约束参数变化

Table 6-9 The geometrical parameters comparison.

	湿表面积		排水体积	
	值 [-]	变化量 [%]	值 [-]	变化量 [%]
S60_C3	1.0620	/	0.0664	/
OPT1	1.0938	3.00	0.0671	1.05
OPT2	1.1006	3.64	0.0676	1.76
OPT3	1.0956	3.16	0.0674	1.57

图 6-12 和图 6-13 展示了三条优化船与母型船在两个航速下的自由面波形图对比。首先，三条优化船在两个航速下的首部波幅有明显降低，这主要是因为优化船均产生了一个球首，它的兴波与船体兴波叠加得到一个消波的效果。此外，在 $Fr=0.4$ 的航速下，OPT1 较小的片体间距导致了片体间兴波干扰提前发生，和母型船的波系有很大的差别：OPT1 首部系的波谷削弱了尾部波峰，包括尾部的横波和散波都大大减弱。这表明 OPT1 片体间发生了有利干扰；OPT2 和 OPT3 的波系干扰相似：片体的首波波峰和第一个波谷都削弱。在 $Fr=0.45$ 的航速下，OPT1 的波系干扰情况和其在 $Fr=0.4$ 的航速下相似，唯一的细微区别在于尾部波峰提前发生。OPT2 和 OPT3 的波系干扰和其各自在 $Fr=0.4$ 的情况相似。

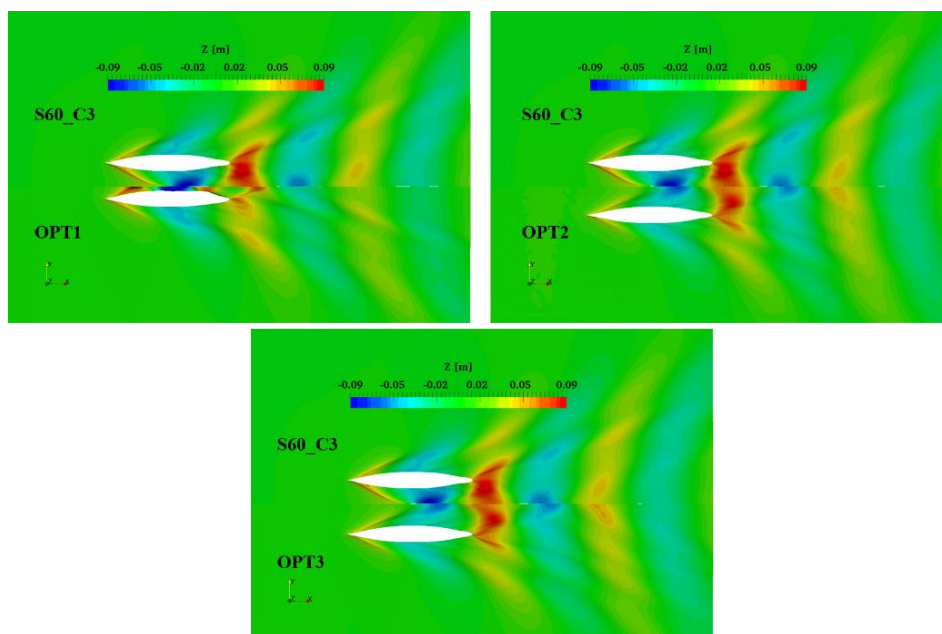


图6-12 在 $Fr=0.4$ 下优化船型(左上: OPT1;右上: OPT2;下中: OPT3)与母型船 S60_C3 兴波对比

Fig.6-12 The wave patterns of the optimal catamarans compared to the initial catamaran at $Fr=0.4$

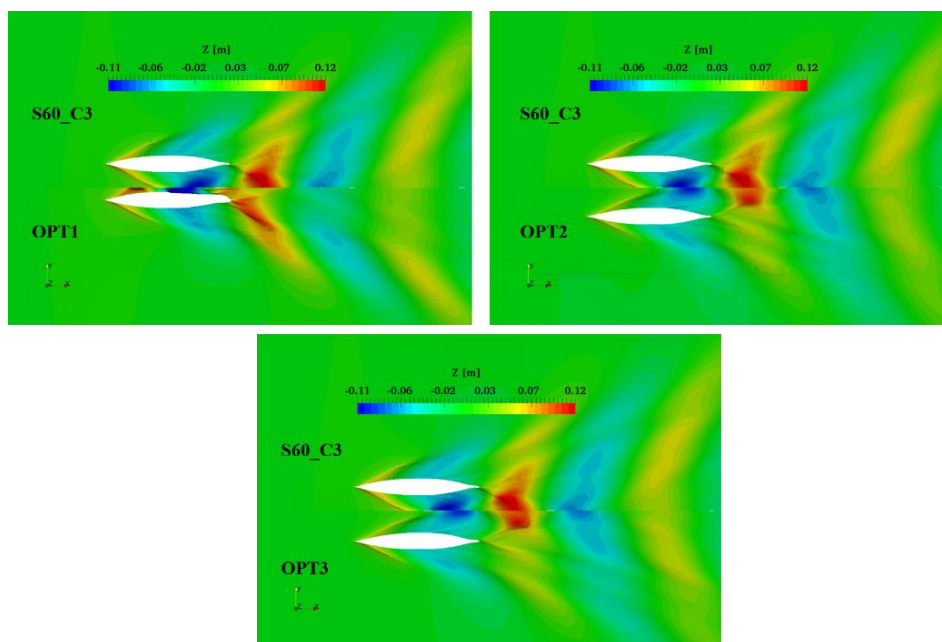


图6-13 在 $Fr=0.45$ 下优化船型(左上: OPT1;右上: OPT2;下中: OPT3)与母型船 S60_C3 兴波对比

Fig.6-13 The wave elevations of the optimal catamarans compared to the initial catamaran at $Fr = 0.45$

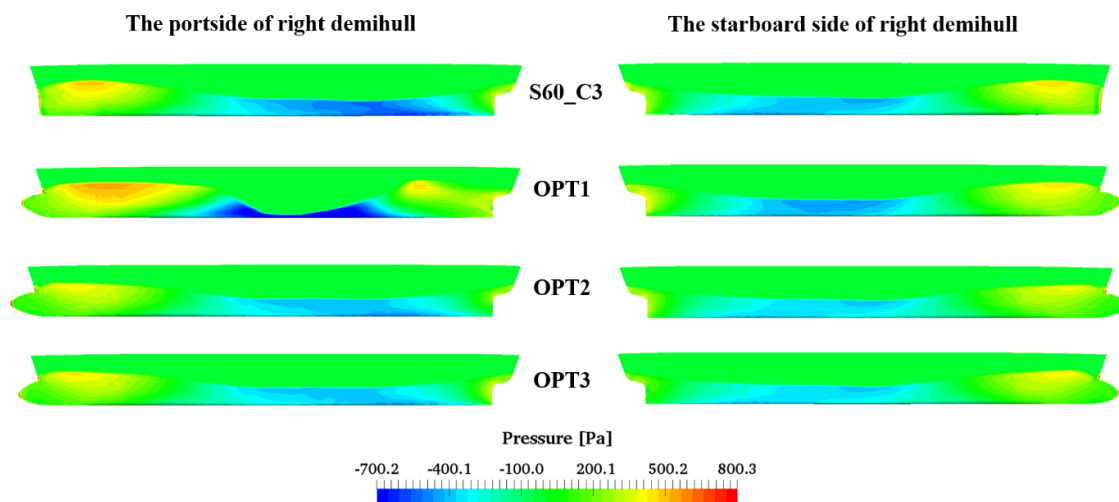


图6-14 在 $Fr=0.4$ 下优化船型与母型船船体表面压力分布对比

Fig.6-14 The pressure field distributions of the optimal catamarans compared to those of the initial catamaran at $Fr = 0.4$

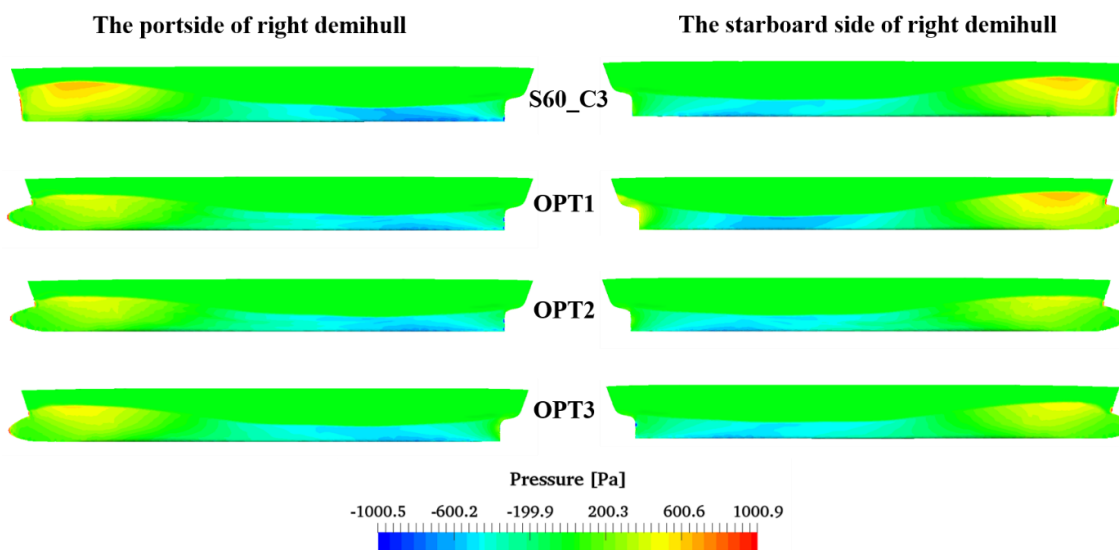


图6-15 在 $Fr=0.45$ 下优化船型与母型船船体表面压力分布对比

Fig.6-15 Pressure field distribution of the optimal catamarans compared to the initial catamaran at $Fr = 0.45$

图 6-14 和图 6-15 展示了优化双体船和母型船的片体上压力分布对比。片体干扰现象也反映在了片体内外侧的压力分布不对称，这也影响了阻力值。在 $Fr=0.4$ 的情况下，优化船的片体的内侧纵向压力梯度和母型船不同：OPT1 在船中有一个较低的波谷导致一个较小低压区而在尾部有一个压力的回升，这就意味着其纵向压力梯度



减小，OPT2 和 OPT3 高压和低压峰值均减小，也使得相应的纵向压力梯度降低；而在优化船片体外侧，优化船的纵向压力梯度基本没太大变化，OPT1 的尾部压力有所抬升，OPT2 和 OPT3 高压和低压峰值都稍微有所降低。

图 6-16 展示了优化船和母型船的右片体中剖面上的横向交叉流对比。从图 6-14 和图 6-15 的压力分布图可以看出由于片体两侧的压力分布不同导致片体上存在横向的压力梯度，因此也就在片体舳龙骨处产生了交叉流，从片体的一侧流向另一侧或者向反方向流动。根据文献(Farkas et al., 2017)，交叉流也会对总阻力值产生影响。

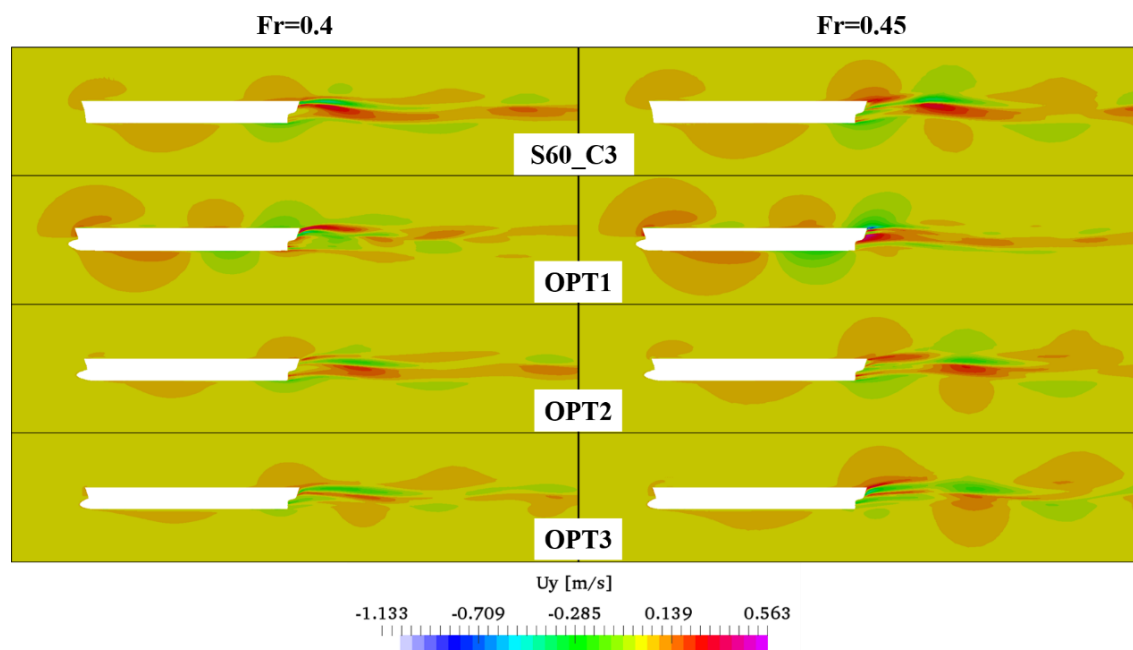


图6-16 在 $Fr=0.4$ (左侧)和 $Fr=0.45$ (右侧) 下优化船和母型船片体中纵剖面交叉流对比

Fig.6-16 The cross flow of the optimal catamarans (OPT1, OPT2 and OPT3) compared to the initial catamaran (S60_C3) at two speeds

对于 OPT2 和 OPT3，尽管交叉流的整体形式和母型船基本一致，但是优化船的交叉流强度较母型船变弱，这也降低了片体间的兴波干扰，因此总阻力也会有所下降，这里可能的原因是这两条优化船相较母型船有较大的片体间距。而对于 OPT1，在两个航速下的交叉流现象都较母型船变强，这都会对总阻力有较大的影响，而在两个航速下，交叉流形式变化不同：在 $Fr=0.4$ 时，交叉流发生在船中和船尾肩部，在船中部，水流从片体外侧流向内侧，增加了片体间波高，在船尾肩部又从片体内侧流向外侧，从而降低了片体间波高，从图 6-12 也看到 OPT1 尾部波峰明显减低；而在 $Fr=0.45$ 时，交叉流仅发生在船中，水流从片体外侧流向内侧，导致在船尾肩部产生



一个小的波峰，这个波一致传到船尾，因此并没有削弱尾波系（见图 6-13），所以，也就没有对总阻力的下降作出贡献。

为了进一步研究片体形状和片体间距对总阻力降幅的单独贡献程度，对三个优化船对应的三个优化片体: OPT1_mono, OPT2_mono, OPT3_mono 进行了单独数值模拟，表 6-10 对比了优化片体与母型片体 S60_mono 的总阻力值，三条优化片体在两个航速下总阻力都有明显降低。

表6-10 在 $Fr=0.4$ （左侧)和 $Fr=0.45$ （右侧）下优化船和母型船片体总阻力对比

Table 6-10 Comparisons of the four monohulls' resistances.

	Rt ($Fr=0.4$)		Rt ($Fr=0.45$)	
	值 [N]	变化量 (%)	值 [N]	变化量 (%)
S60_mono	18.191	/	27.901	/
OPT1_mono	17.069	-6.17	26.968	-3.34
OPT2_mono	16.615	-8.66	26.482	-5.09
OPT3_mono	16.694	-8.23	26.651	-4.48

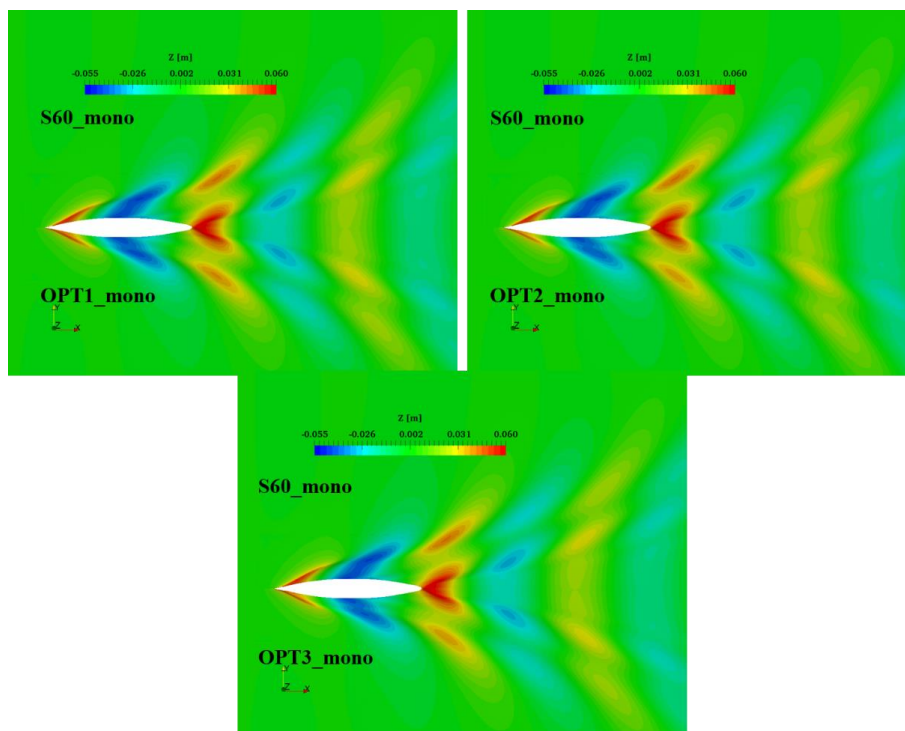


图6-17 在 $Fr=0.4$ 下优化单体船与母型单体船的兴波对比

Fig.6-17 The wave elevations of the optimal monohulls (upper left: OPT1_mono; upper right: OPT2_mono; lower centre: OPT3_mono) compared to those of the initial S60 monohull (S60_C3) at $Fr = 0.4$

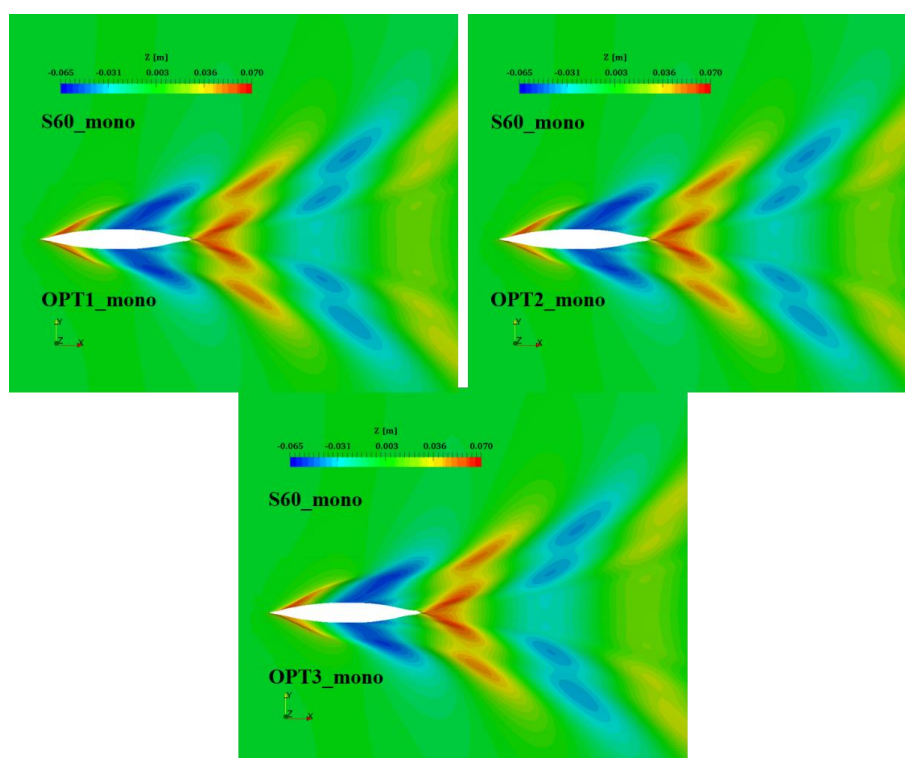


图6-18 在 $Fr=0.45$ 下优化单体船与母型单体船的兴波对比

Fig.6-18 The wave patterns of the optimal monohulls (upper left: OPT1_mono; upper right: OPT2_mono; lower centre: OPT3_mono) compared to those of the initial S60 monohull (S60_C3) at $Fr = 0.45$

图 6-17 和图 6-18 对比了三条优化单体较母型单体的兴波高度。三条优化单体在两个航速下的首波波峰均明显降低，船中位置的波谷和船尾后的波峰峰值均有所降低，表明了优化片体船的兴波阻力值下降。图 6-19 和图 6-20 展示了优化单体与母型单体的压力分布对比，在两个航速下，优化单体的首部高压峰值及高压面积均明显降低，低压峰值也有所降低，这也导致相应的纵向压力梯度有所降低，这些都会对阻力下降起到有利作用。

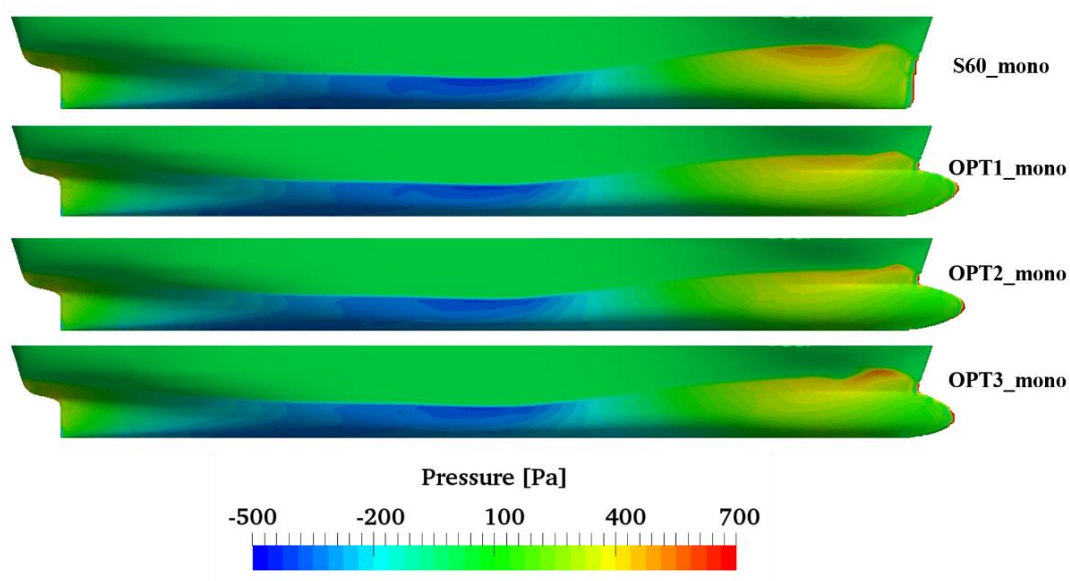


图6-19 在 $Fr=0.4$ 下优化单体船与母型单体船船体压力分布对比

Fig.6-19 The pressure field distribution of the optimal monohulls compared to that of the initial monohull at $Fr = 0.4$

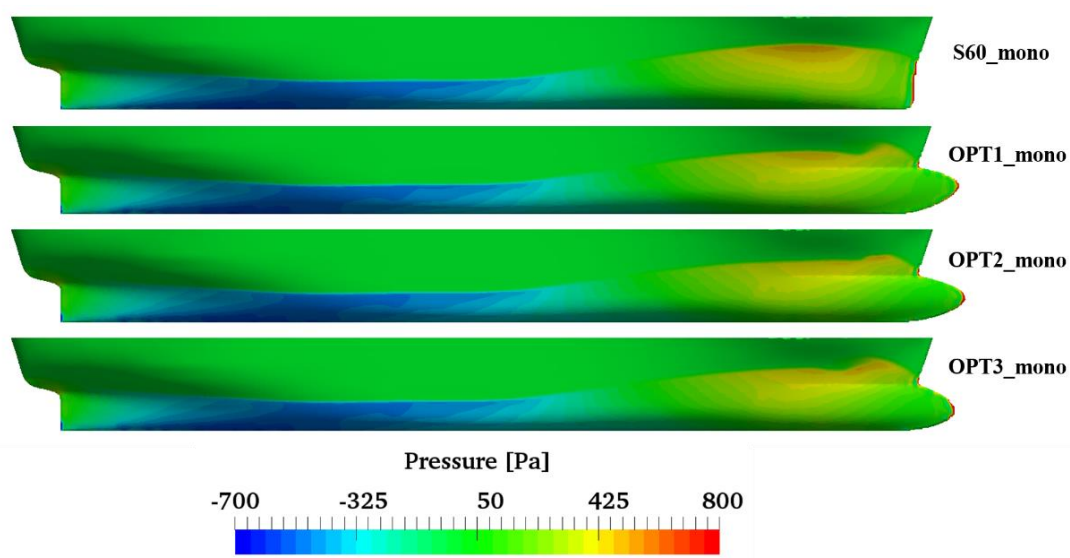


图6-20 在 $Fr=0.45$ 下，优化单体船与母型单体船船体压力分布对比

Fig.6-20 The pressure field distribution of the optimal monohulls compared to that of the initial monohull at $Fr = 0.45$



干扰阻力的定义如下：双体船的总阻力和对应单体船的总阻力两倍的差值 (Farkas et al., 2017)。干扰因子 (Interference Factors, IF) 如公式所示，定义为干扰阻力与单体船总阻力两倍的比值：

$$IF = \frac{R_{T,C} - 2R_{T,MH}}{2R_{T,MH}} \quad (6-2)$$

其中， $R_{T,C}$ 是双体船的总阻力值， $R_{T,MH}$ 是对应单体船总阻力值。

表 6-11 展示了优化双体船和母型船的干扰因子 IF 的值。从表中可以看出，母型船在两个航速下的干扰因子都较大，换句话说就是，因为干扰影响，母型双体船在两个航速下较单体船两倍总阻力值，其总阻力分别增加了 22.48% 和 23.67%。通过优化，得到的优化船中，除了 OPT1 在 $Fr=0.45$ 航速的情况，其余在两个航速下的 IF 值都有明显降幅。对于 OPT1 在 $Fr=0.4$ 时有一个很可观的 IF 降幅，下降至了 3.75%，此外，从兴波波形对比图 6-12 也可以看出 OPT1 在该航速下兴波高度明显降低。相比较而言，在 $Fr=0.45$ 时 IF 值有所增加，这也是导致总阻力增加的主要原因。

表6-11 优化船与母型船的 IF 值对比

Table 6-11 Deviation of IF values of the initial and optimal catamarans.

	IF ($Fr=0.4$)		IF ($Fr=0.45$)	
	Value [-]	Variation (%)	Value [-]	Variation (%)
S60_C3	0.2248	/	0.2367	/
OPT1	0.0375	-83.33	0.2816	18.97
OPT2	0.1720	-23.46	0.1076	-54.55
OPT3	0.1900	-15.49	0.1250	-47.20

图 6-21 展示了优化双体船和母型船在中纵剖面上的纵向波切(黑色实线)对比。图中蓝色虚线表示双体船对应单体船在对应 $y = s/2$ 处的纵向波切的两倍曲线。双体船和单体船的纵向波切线差别揭示了兴波干扰现象。OPT1 在 $Fr=0.4$ 和 0.45 时产生了非常大的干扰，在 $Fr=0.4$ 时 OPT1 首波峰变高，而尾波有所降低这对总阻力产生了有利干扰，而在 $Fr=0.45$ 时 OPT1 的波峰变高，导致一个较大的阻力值。对于 OPT2 和 OPT3 在两个航速下双体船和单体船的纵向波切形状对比较母型船与单体船对比情况更加趋于一致，这表明 OPT2 和 OPT3 的兴波干扰有所降低。另外，优化双体船船体周围波高较母型船也有所降低。

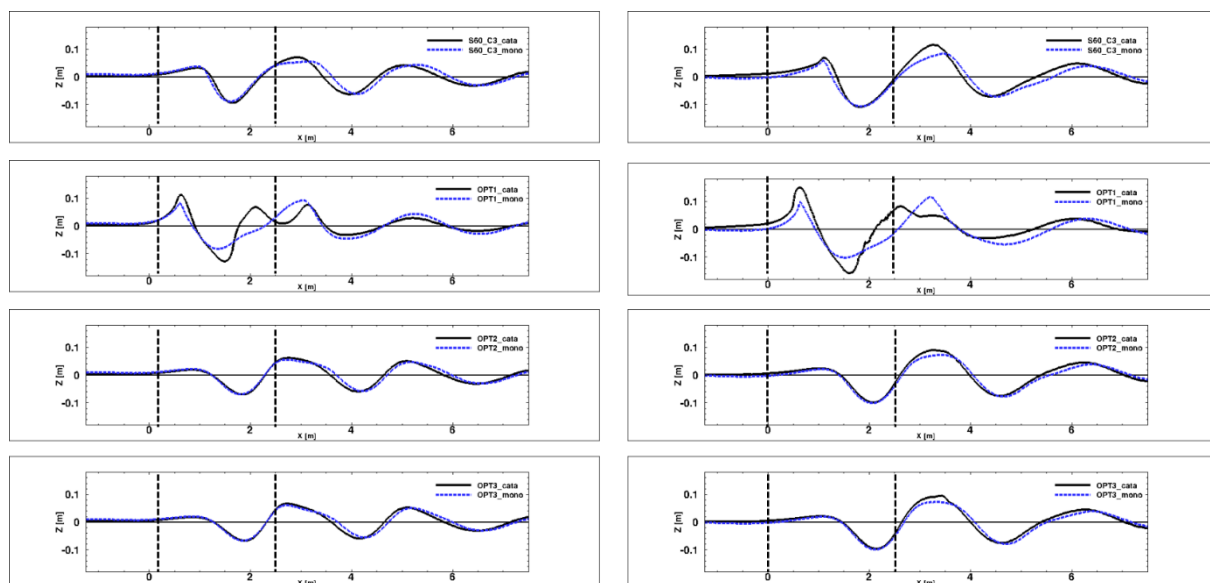


图6-21 在 $Fr=0.4$ (左侧) 和 $Fr=0.45$ (右侧) 下优化船与母型船中纵剖面的波形对比, 船体位于两条虚线之间

Fig.6-21 Longitudinal wave cuts for the initial and the optimised catamarans at $Fr = 0.4$ (left) and $Fr = 0.45$ (right). The two black dashed lines bracket the section of the ship which was compared.

综上所述, 可以推断, 优化船的片体形状都拥有一个较长, 较肥, 较平直的球鼻艏。这样的形状能够减小母型船首部的高压区 (见图 6-19 和图 6-20), 整体而言, 优化的片体形状对 $Fr=0.4$ 和 0.45 的阻力影响是一致的 (见表 6-10)。相对于片体形状的因素, 片体的间距影响较大, 并且在 $Fr=0.4$ 和 0.45 的情况下影响不一致 (见图 6-9 和表 6-11)。针对 $Fr=0.4$ 时片体间距变大或者变小都有可能降低片体间的不利兴波干扰 (见图 6-9 和图 6-12), 而在 $Fr=0.45$ 时, 片体间距变更更有利于阻力性能 (见图 6-9 和图 6-13)。船体表面的压力峰值基本降低 (见图 6-14 和图 6-15)。而不管在哪个航速下, 间距变得足够大时都会使得片体间的流动更加不受干扰, 因而交叉流就会大大减弱 (见图 6-16), 这也有利于阻力性能。

6.4 本章小结

针对高速双体船片体之间流动干扰对兴波阻力和粘性阻力都有影响, 本章针对高速双体船的两个航速下的总阻力性能进行了基于粘流理论的多目标优化。考虑了高速双体船片体首部形状及片体间距的变化, 对其进行了两个典型航速下的总阻力优化设计, 采用了 FFD 方法进行首部大变形, 并采用了 Sobol 算法对其进行了船型



采样，构建了符合精度需求的目标性能的近似模型，依赖近似模型采用 NGSA-II 算法最终获得了最优系列船型，并针对优化船型进行了非常详细的流场信息验证分析。本章验证了本文开发的基于粘流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0 在高速多体船的船型设计问题的实用性。



15008826



第七章 低速肥大型船的总阻力及伴流综合性能优化

7.1 引言

前面一章对水面船舶的阻力性能进行了多目标的型线优化设计。而对于水面船舶尾部桨盘面的伴流性能也同样重要，船舶尾部桨盘面的伴流越均匀，推进效率越高，倘若船型不佳，则有可能导致阻力较大。因此，在船型优化设计时，应该综合考虑阻力和尾部伴流性能，从而使得设计船拥有最小的阻力和最好的伴流性能，即拥有优良的快速性。

本章将对一艘低速散货船在设计航速下的阻力和伴流性能进行优化设计。该散货船属于低速肥大型船，一方面，这类船只在航行时总阻力成分中占比较大的是粘性阻力，因此，对于总阻力的评估必须考虑粘性影响；另一方面，船体尾部型线收缩越快，尾部伴流场越不均匀；此外，阻力性能通常和桨盘面伴流特性一般可能存在矛盾的关系。对于低速肥大型船，部分学者采用过叠模绕流的方式进行数值计算，以此加快优化，减少计算资源（李胜忠，2012）。因此本章节以某散货船标模 JBC 的总阻力和尾部伴流不均匀度为优化目标，采用 FFD 方法对船首船尾进行几何重构和 EGO 方法进行优化求解，开展了 JBC 船的总阻力和伴流性能优化设计，详细分析了优化结果。最后给出了本章小结。

7.2 母型船的阻力和伴流性能数值计算

7.2.1 母型船的基本信息

JBC（Japan Bulk Carrier）是一艘好望角型散货船，该船也是国际公认的标准船模，在东京召开的 CFD 船舶水动力学 T2015 workshop 提供了非常详细的试验结果可供数值计算验证。该船属于低速肥大型散货船。其三维模型如图 7-1，主尺度详细信息见表 7-1。从三维模型以及方形系数值也可以看出属于肥大型船舶。



低速肥大型船舶的兴波阻力成分占比较低，粘性阻力占主导，而粘性阻力中的粘压阻力跟船体形状关系密切，特别是肥大型船舶或者船体曲率骤变处容易产生旋涡，从而产生粘压阻力；而尾部的形状直接影响桨盘面的伴流性能，因此，本章节考虑对 JBC 船的首部和尾部形状进行变形，从而综合优化其在设计航速 $Fr=0.142$ 下的总阻力和桨盘面伴流性能。

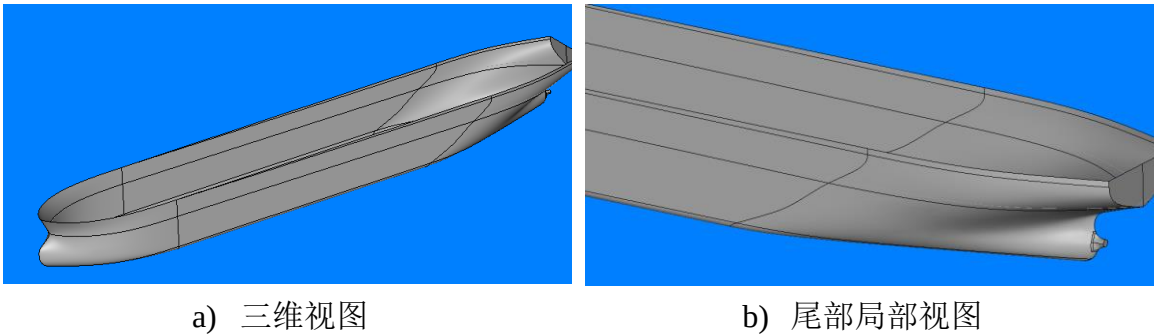


图7-1 JBC 船模的几何模型
Fig.7-1 Geometry model of JBC

表7-1 JBC 模型的几何主尺度
Table 7-1 Main particulars of JBC

主尺度	符号和单位	模型尺度
缩尺比	λ	1/40
垂线间长	$L_{pp} \text{ (m)}$	7
最大船宽	$B_{WL} \text{ (m)}$	1.125
吃水	$T \text{ (m)}$	0.4125
型深	$D \text{ (m)}$	0.625
排水体积	$\nabla \text{ (m}^3\text{)}$	2.787
湿表面积	$S_w \text{ (m}^2\text{)}$	12.223
方形系数	C_B	0.858
纵向浮心位置(船中向前为正)	$LCB \text{ (\%}L_{pp}\text{)}$	2.5475

7.2.2 母型船的阻力和流场数值计算可靠性验证

首先对 JBC 船在 $Fr=0.142$ 下的总阻力数值计算的验证和确认分析。本算例采用的计算域大小及边界条件如图 7-2 所示。采用了三套不同密度的网格如图 7-3 所示，



计算的结果见表 7-2，从表中可以看出，总阻力一致收敛，当达到中等网格时，数值预报结果较试验结果误差较小（2.518%），姿态预报误差也相当。网格的不确定性最大不超过 4%。因此，后续的数值计算均采用中等网格。

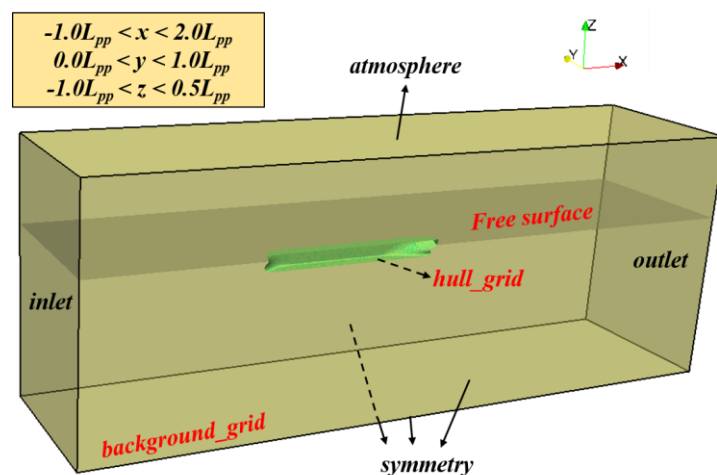


图7-2 计算域大小和边界条件设置

Fig.7-2 Fig.6-2 The size of the computational domain and boundary conditions

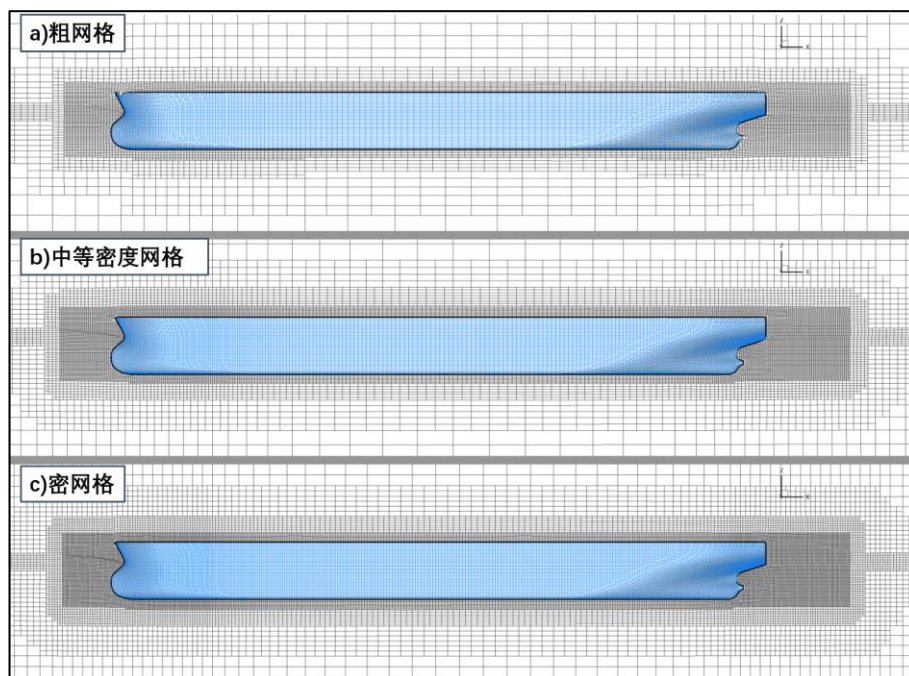


图7-3 JBC 船模用于网格不确定性分析的计算网格

Fig.7-3 Computational mesh of JBC model for grid uncertainty analysis



表7-2 JBC 在航速 $Fr=0.142$ 下的网格不确定性分析

Table 7-2 Uncertainty analysis for JBC at $Fr=0.142$

Parameters		EFD (D)	V&V Study			r_G	$\varepsilon_{12}\%S_1$	U_1/ε_{12}	$P_G/P_{G,th}$	$U_G\%S_1$
			Grid#3 (S ₃)	Grid#2 (S ₂)	Grid#1 (S ₁)					
$C_T \times 10^3$	Value	4.289	4.729	4.181	4.273	1.414	2.153	0.073	2.576	3.874
	E%D	/	-9.304	2.518	0.373	/	/	/	/	/
$C_F \times 10^3$	Value	/	2.917	2.740	2.821	1.414	2.871	0.079	1.128	3.323
$C_p \times 10^3$	Value	/	1.812	1.441	1.452	1.414	0.758	0.004	5.078	1.493
sinkage [% L_{pp}] upward positive	Value	-0.086	-0.090	-0.088	-0.087	1.414	1.149	0.007	1.000	-1.151
	E%D	/	-4.651	-2.326	-1.163	/	/	/	/	/
trim [% L_{pp}] bow up positive	Value	-0.180	-0.186	-0.183	-0.181	1.414	1.105	0.045	0.585	-2.210
	E%D	/	-3.333	-1.667	-0.556	/	/	/	/	/

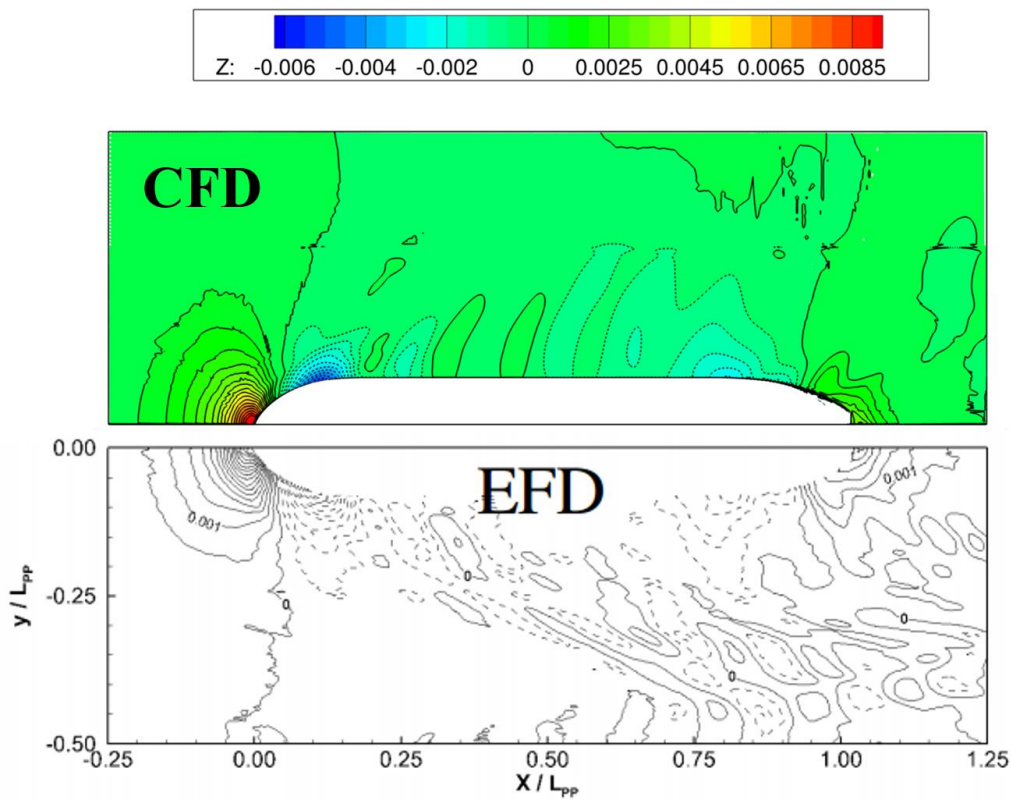


图7-4 JBC 在 $Fr=0.142$ 航速下的自由面兴波波形同试验对比

Fig.7-4 Comparison of wave pattern of JBC at $Fr=0.142$



图 7-4 展示的是 JBC 船的自由面波形计算结果与试验结果的对比图，可以看出船体周围整个自由面波形捕捉得很全，和实验结果非常吻合，同时也可以看出由于航速较低整个自由面只有在首部和肩部有明显的兴波。

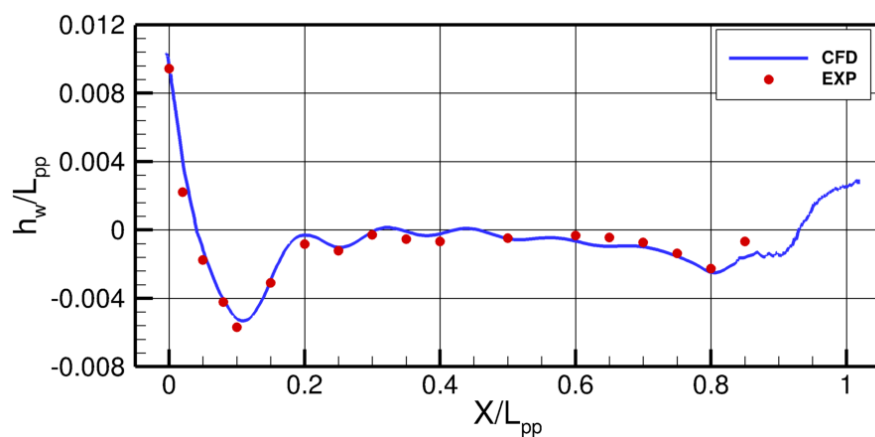


图7-5 $Fr=0.142$ 航速下的船体表面波高的比较

Fig.7-5 Comparison of wave profiles of JBC at $Fr=0.142$

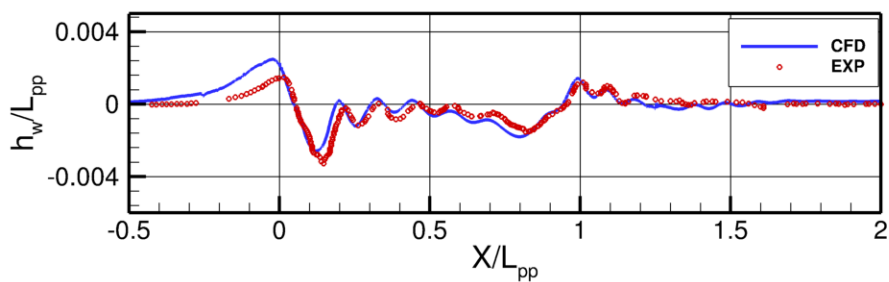


图7-6 JBC 船舷侧 $y/L_{pp} = 0.1043$ 处纵切波高同实验值对比

Fig.7-6 Comparison of wave profile of JBC at $y/L_{pp} = 0.1043$

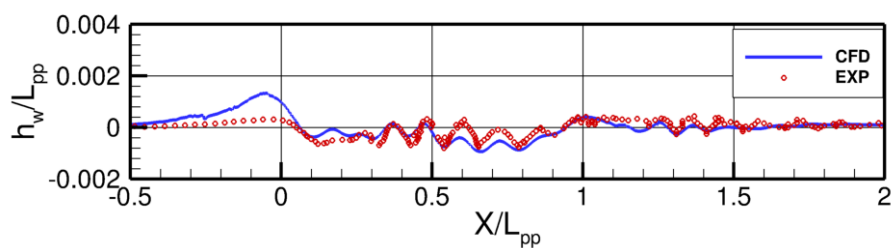


图7-7 JBC 船舷侧 $y/L_{pp} = 0.19$ 处纵切波高同实验值对比

Fig.7-7 Comparison of wave profile of JBC at $y/L_{pp} = 0.19$

图 7-5 展示的是船侧波高数值计算结果与试验结果的对比图，可以看出相当吻合；图 7-6 和图 7-7 展示的是船侧 $y/L_{pp} = 0.1043$ 以及 $y/L_{pp} = 0.19$ 处波高数值结果与试验结果的对比图，沿着船长方向整个趋势基本吻合，局部对应的波高值还存在一定差距，出现差距的原因应该是这两处的网格密度不够，这也是考虑到为了实现基于粘流理论的优化设计，在不影响目标水动力性能的评估精度情况下尽可能减少网格量，从而降低计算成本，加速优化。

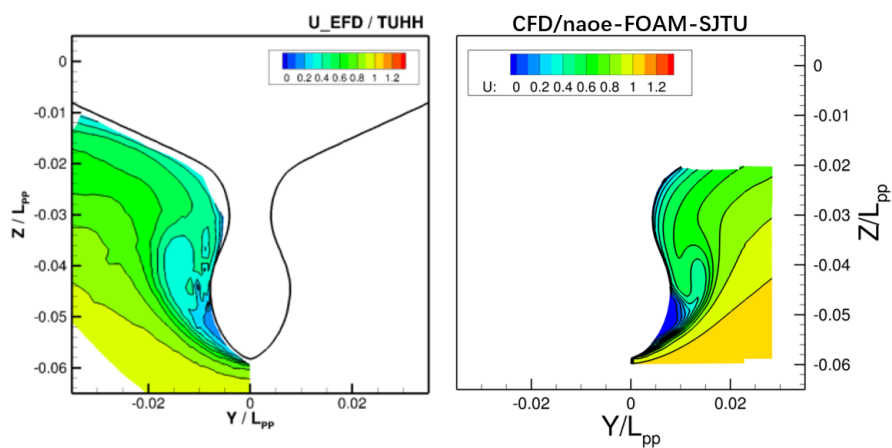


图7-8 在 $x/L_{pp} = 0.9625$ 剖面处伴流场的比较

Fig.7-8 Comparison of wake profile at $x/L_{pp} = 0.9625$

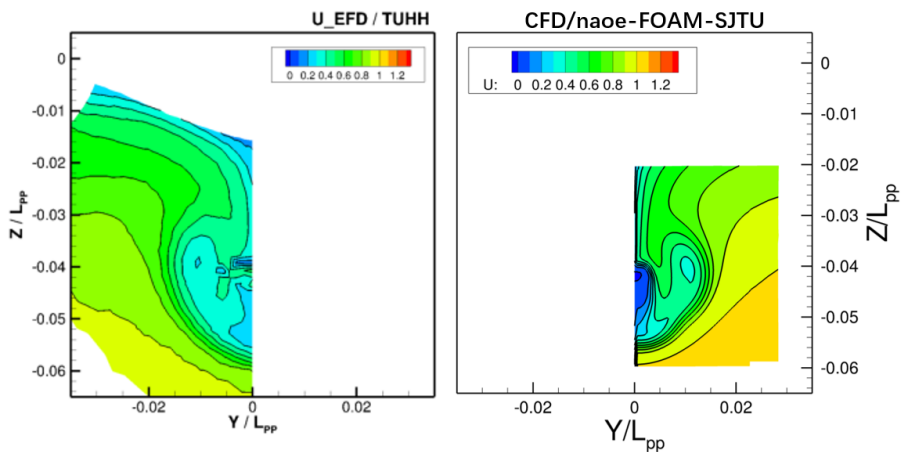


图7-9 在 $x/L_{pp} = 0.9843$ 剖面处伴流场的比较

Fig.7-9 Comparison of wake profile at $x/L_{pp} = 0.9843$

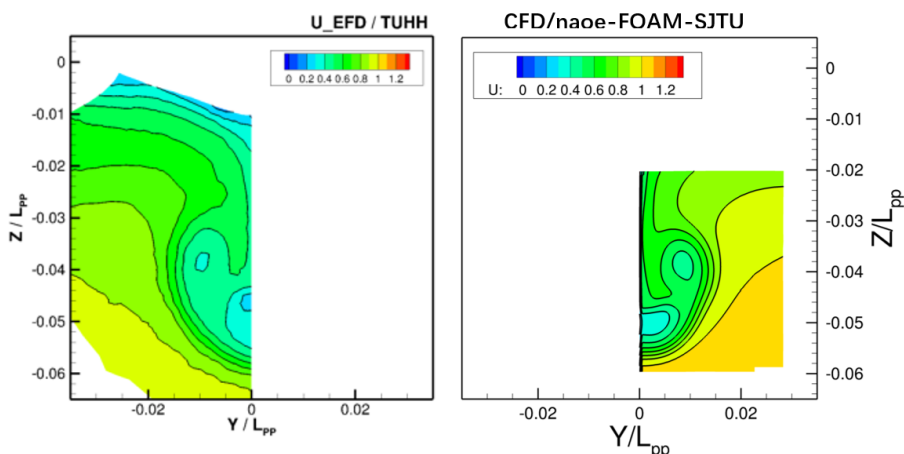
图7-10 在 $x/L_{pp}=1$ 剖面处伴流场的比较Fig.7-10 Comparison of wake profile at $x/L_{pp}=1$

图 7-8、图 7-9 和图 7-10 展示的是尾部三个位置处的伴流数值计算结果与试验结果的对比图，这三个位置分别在螺旋桨前、螺旋桨处以及螺旋桨后。计算结果与试验结果非常吻合，且数值计算与模型试验的结果都捕捉到了一个明显的“兔耳”形状。

7.3 优化设计及结果分析

7.3.1 优化问题定义

本章节旨在优化 JBC 船模在设计航速 $Fr=0.142$ 下的总阻力值及尾部桨盘面伴流性能，采用了 FFD 方法（见图 7-11，图 7-12）进行首部和尾部的船型变换，采用 Sobol 方法进行初始采样，然后采用多目标 EGO 方法进行更新近似模型并寻优，最终获得最优船型。设计变量的范围见表 7-3，所有变量范围值均为无因次化值，前四个设计变量是首部 FFD 框对应的变形参数变量： x_1 对应于图 7-11a) 中红色点沿船长方向的可移动量， x_2 对应于图 7-11b1) 和 b2) 中红色点沿船宽方向的可移动量（注：船宽方向的移动都是对称变形）， x_3 对应于图 7-11 c1) 和 c2) 中红色点沿船宽方向的可移动量， x_4 对应于图 7-11 d) 中红色点沿吃水方向的可移动量；后四个设计变量是尾部 FFD 框对应的变形参数变量： x_5 对应于图 7-12e) 中红色点沿船宽方向的移动量， x_6 对应于图 7-12f1) 和 f2) 中红色点沿船宽方向的可移动量， x_7 对应于图 7-12g1) 和 g2) 中红色点沿船宽方向的可移动量， x_8 对应于图 7-12h) 中红色点沿吃水方向的可移动量。这些变形参数分别控制着球首的长度、首部艤部和水线处的型线，尾部的艤部和水线处的型线。

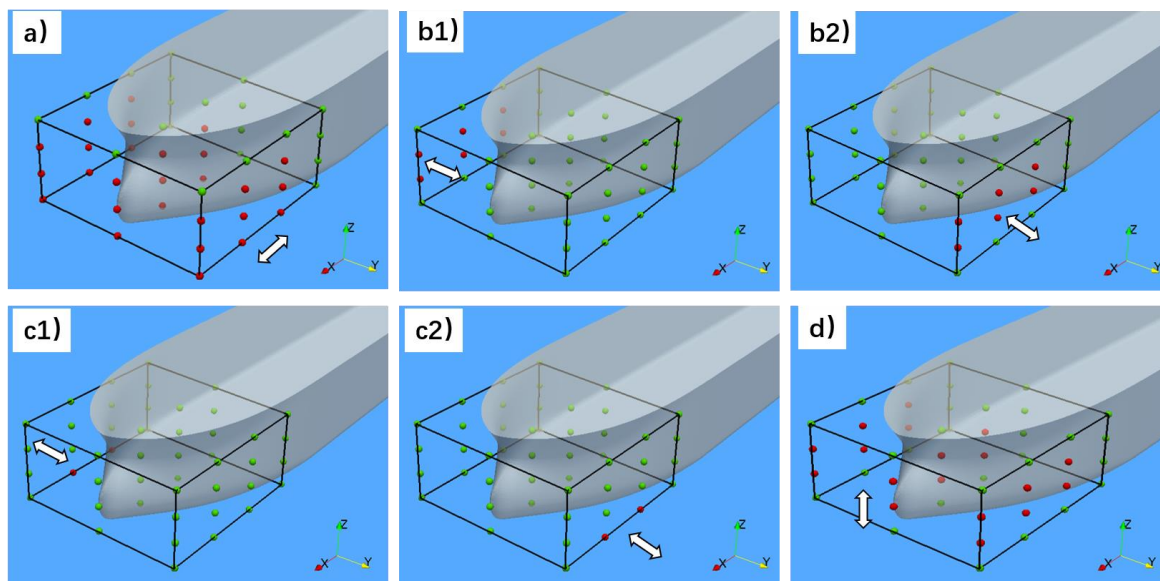


图7-11 基于 FFD 方法的 JBC 首部变形

Fig.7-11 Bow deformation of JBC based on FFD method

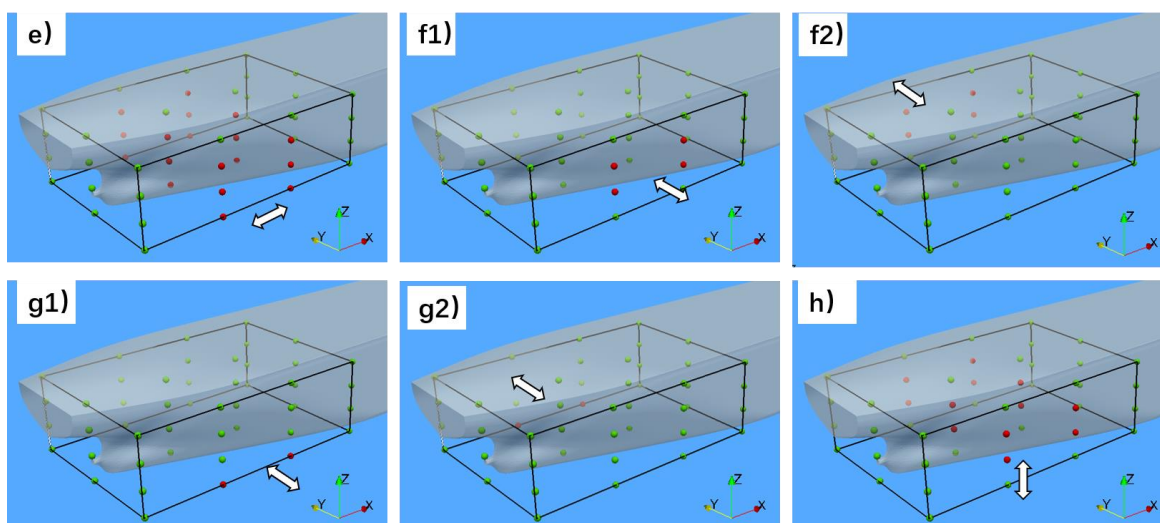


图7-12 基于 FFD 方法的 JBC 尾部变形

Fig.7-12 Stern deformation of JBC based on FFD method



表7-3 设计变量及其范围

Table 7-3 Design variables and their ranges.

设计变量	下界	上界	备注
$x_1(\%L_{pp})$	-0.005	0.01	首部沿船长方向移动
$x_2(\%L_{pp})$	-0.005	0.006	首部水线处沿船宽方向移动
$x_3(\%L_{pp})$	-0.005	0.006	首部舭部沿船宽方向移动
$x_4(\%L_{pp})$	-0.005	0.005	首部沿吃水方向移动
$x_5(\%L_{pp})$	-0.005	0.005	尾部沿船长方向移动
$x_6(\%L_{pp})$	0	0.006	尾部水线处沿船宽方向移动
$x_7(\%L_{pp})$	-0.008	0.008	尾部舭部沿船宽方向移动
$x_8(\%L_{pp})$	-0.01	0.005	尾部沿吃水方向移动

目标函数有两个：在 $Fr=0.142$ 航速下的总阻力及伴流性能。数值方法采用 RANS 方法。而关于伴流性能评估，为了考察桨盘面的伴流均匀性，采用了桨盘面伴流性能指标 W ($x/L_{pp}=0.9843$)，根据第五章公式 (5-2) 计算。两个目标函数表示如式 (7-1)，对排水体积及湿表面积进行一定的约束：

$$\min \begin{cases} f_{obj}^1 = R_t \\ f_{obj}^2 = W \end{cases} \quad \text{Subject to: } \left| \frac{S_w - S_{w0}}{S_{w0}} \right| \leq 1\%, \quad \left| \frac{\nabla - \nabla_0}{\nabla_0} \right| \leq 1\% \quad (7-1)$$

7.3.2 灵敏度分析

本章节在优化之前针对设计变量对目标函数的影响情况进行了灵敏度分析。在不改变其他设计变量的情况下，只改变其中任一设计变量，共涉及了 32 组新样本点通过 CFD 进行了数值计算，得到初步的灵敏度结果如图 7-13。针对目标函数之一：总阻力， x_7 的变化对其影响范围较大，约 4%， x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_5 和 x_8 的变化对其影响范围相当，基本在 1.5%~2%，而 x_4 和 x_6 的变化对其影响范围甚小；针对另一目标函数：伴流性能指标：尾部四个参数 x_5 、 x_6 、 x_7 和 x_8 对其影响范围较大，影响较明显，而首部四个参数 x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 对其影响相对不显著。当然这里只是一个初步的敏感度分析，并未考虑设计变量的相互作用对目标函数的影响。

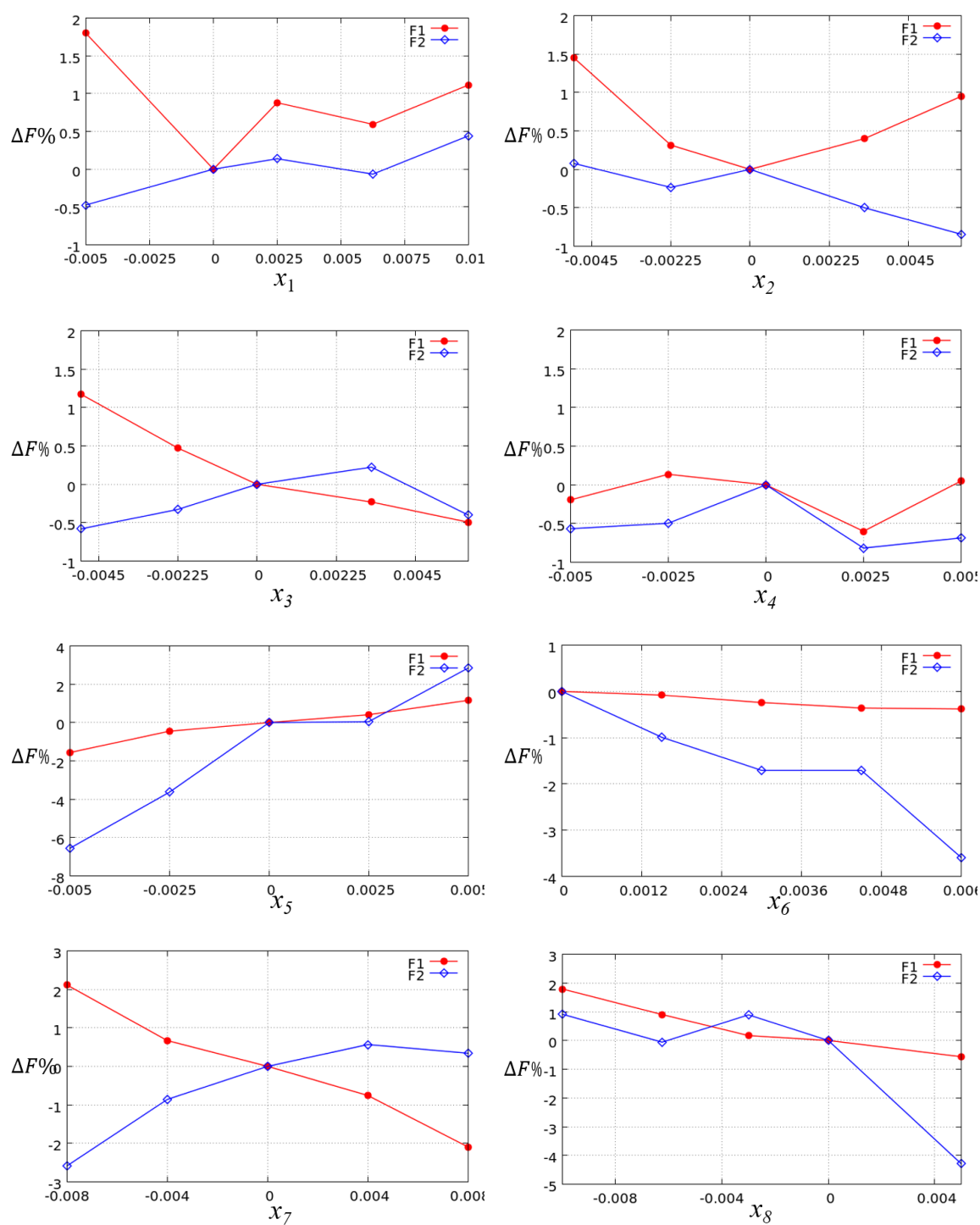


图7-13 设计变量的敏感度分析

Fig.7-13 Sensitivity analysis of the design variables



7.3.3 优化算法设置

首先采用 Sobol 方法采样了 56 个初始样本船型, 对样本船型采用 RANS 方法求解总阻力值以及伴流性能值, 然后得到 56 组数据, 通过 Kriging 构建初始近似模型, 然后采用多目标 EGO 方法迭代求解最优性能组合的船型。其中 EIM 函数寻优采用遗传算法, 具体参数设置见表 7-4。

表7-4 JBC 船优化参数设置

Table 7-4 Optimization parameters setup of JBC

参数	数值
初始样本点数	56
最大迭代次数	30
种群个体数	50
种群迭代次数	300
交叉率	0.8
变异率	0.3
最优种群个数比例	0.3

7.3.4 优化船与母型船对比分析

经过 28 次迭代添加了 28 个新的样本点, 满足了收敛条件, 得到收敛图如图 7-14 所示, 总阻力最大降幅达到 3.52%(图中 Opt1), 伴流均匀度指标最大降幅为 13.69%(图中 Opt3)。此外, 还选择了一个优化船 Opt2, 对这三条典型的优化船型和母型船的型线、总阻力值、伴流性能以及其他详细流场信息进行了对比分析。

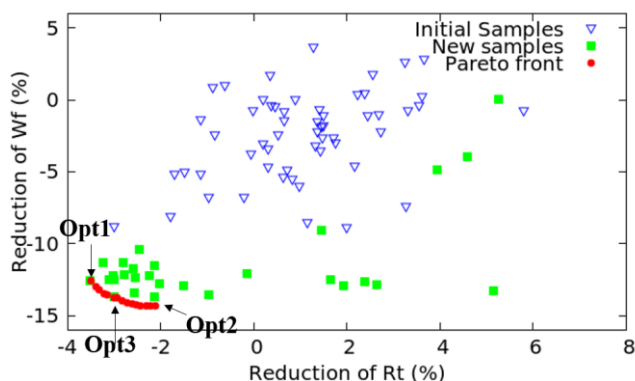


图7-14 基于 EGO 方法添加的样本点集、初始样本点集以及 Pareto 解

Fig.7-14 Initial samples by Sobol, new samples and Pareto front based on EGO method



从表 7-5 中可以看出三条优化船相对于母型船，总阻力的优化主要归功于压阻力的减小，而摩擦阻力基本不变，因为我们对湿表面积进行了约束。从表中看出 Opt1 的压阻力降幅最大达到 10.207%，而因为本身压阻力占总阻力只有 30%，所以总阻力降幅最大 3.52%，伴流均匀度指标降幅都比较显著，最大降幅 13.689%。表 7-6 展示的是三条船对应的设计变量取值，从表中可以显著看出首部四个变形参数有显著差异，而尾部四个变形参数趋于一致。0 展示了三条优化船湿表面积与排水体积变化情况。湿表面积的变化较小，排水体积都有相对明显的降低但是在约束范围内。

表7-5 优化船型和母型船的目标函数对比

Table 7-5 Comparison of objective functions between optimized and initial hulls

	R_p (N)	R_f (N)	R_t (N)	$\Delta R_p\%$	$\Delta R_f\%$	$\Delta R_t\%$	W_f	$\Delta W_f\%$
Initial	6.445	12.176	18.620	/	/	/	0.328	/
Opt1	5.787	12.178	17.965	-10.207	0.020	-3.520	0.287	-12.593
Opt2	6.026	12.196	18.222	-6.503	0.166	-2.142	0.283	-13.689
Opt3	5.859	12.200	18.059	-9.083	0.200	-3.013	0.283	-13.677

表7-6 所选优化船型对应的设计变量

Table 7-6 Design variables of the optimal hulls

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
Opt1	0.004659	0.000623	0.003549	0.003097	0.004996	0.005997	0.007805	0.004989
Opt2	0.008949	0.001344	0.000657	0.00326	0.004992	0.005918	0.007996	0.004998
Opt3	0.006984	0.000751	0.002483	0.00317	0.004994	0.005969	0.007903	0.004997

表7-7 所选优化船型与母型船几何约束参数变化

Table 7-7 Geometrical parameters comparison

	S_w (m ²)	$\Delta S_w\%$	∇ (m ³)	$\Delta \nabla\%$
Initial	12.216	/	2.787	/
Opt1	12.179	-0.305	2.761	-0.953
Opt2	12.234	0.140	2.772	-0.552
Opt3	12.207	-0.074	2.767	-0.736

图 7-15 展示了三条优化船与母型船横剖线对比情况，相较于表 7-6 所示的变形参数的取值，更加直观地看出了三条优化船型的形状变化，首部均变肥，Opt2 最宽，Opt3 次之；而尾部三条船型变形可以说基本相同，较母型船瘦削。图 7-16 展示的是

三条优化船与母型船纵剖线的对比情况，可以看出三条优化船较母型船首部均变长，Opt2 变化最大，Opt3 次之；尾部纵剖线较母型船变化明显，但趋于一致。并且可以看出桨轴位置并没有因此改变，这在实际船型优化案例中一般也会有要求。

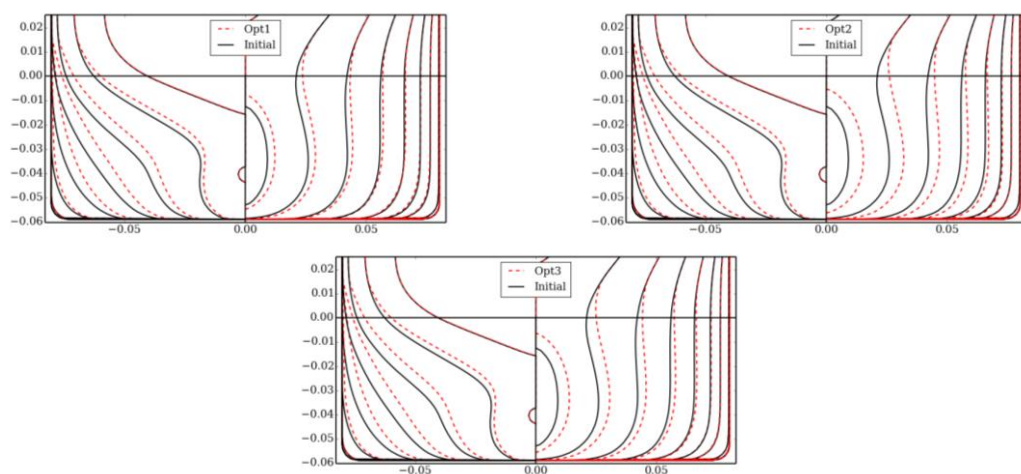


图7-15 优化船与母型船船型横剖线对比

Fig.7-15 Comparison of bodylines between between initial and optimized hulls

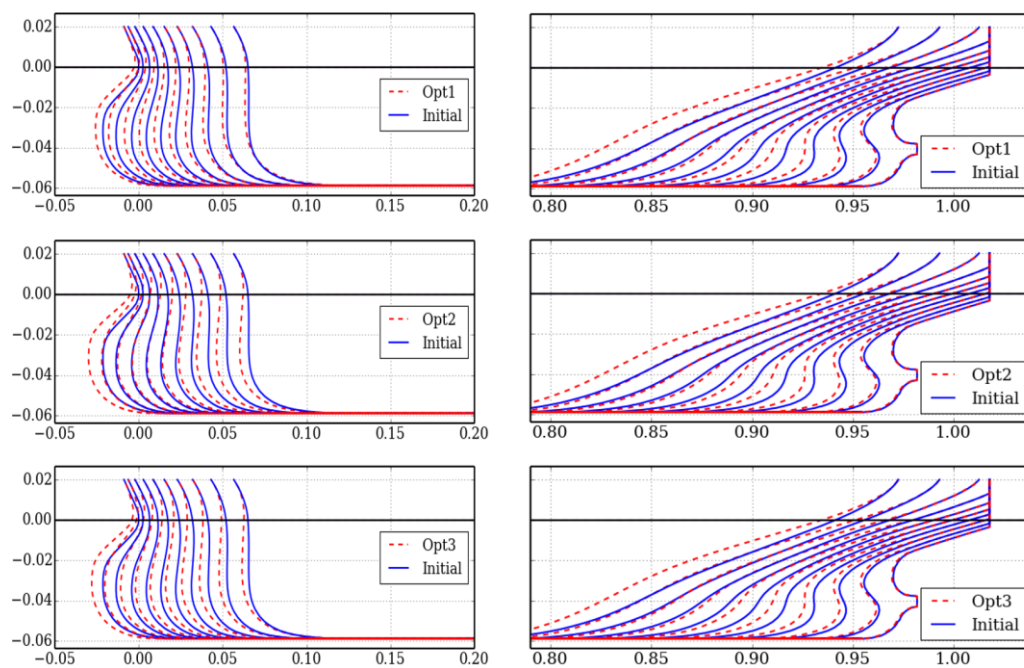


图7-16 优化船与母型船船型纵剖线对比

Fig.7-16 Comparison of sheerplane between between initial and optimized hulls

图 7-17 展示的是优化船与母型船的自由面波形对比结果，首先三条优化船较母型船而言，前肩位置到船中的波高降低，靠近尾部的波谷提前了，并且范围变小了。而比较三条优化船可以看出 Opt1 兴波高度降低稍微较大。因此，优化船的兴波阻力有所降低。

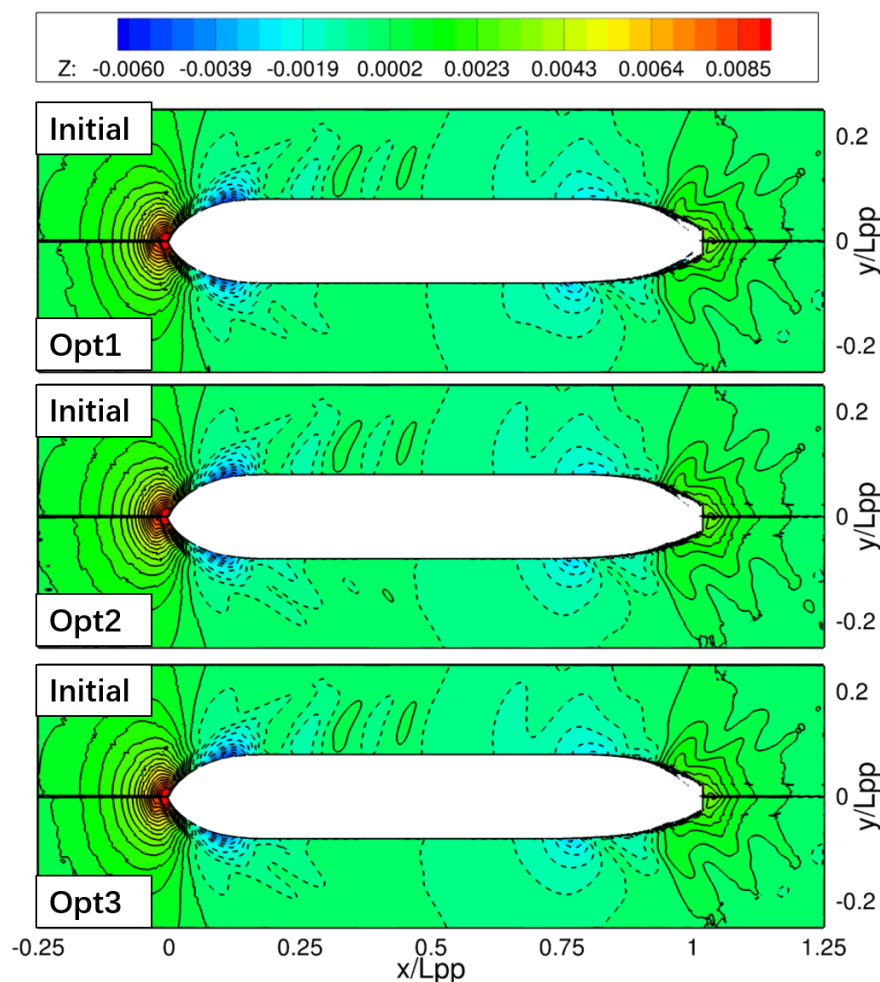


图7-17 JBC 母型船与优化船的自由面兴波波形对比

Fig.7-17 Comparison of wave pattern between initial and optimized hulls

图 7-18、图 7-19 以及图 7-20 展示了优化船与母型船船体压力分布整体以及局部对比结果。从图 7-18 可以看出首尾纵向压力梯度降低；从图 7-19 可见首部低压区峰值和面积降低；从图 7-20 可见尾部高低峰值降低，低压区面积减小。这也直接表明优化船的压阻力降低。图 7-21 和图 7-22 都展示了优化船与母型船的涡量对比情况，从图 7-21 可见首部涡量变化不明显，而尾部涡量变化明显，尾部涡量强度减小，这表明粘压阻力有所降低。

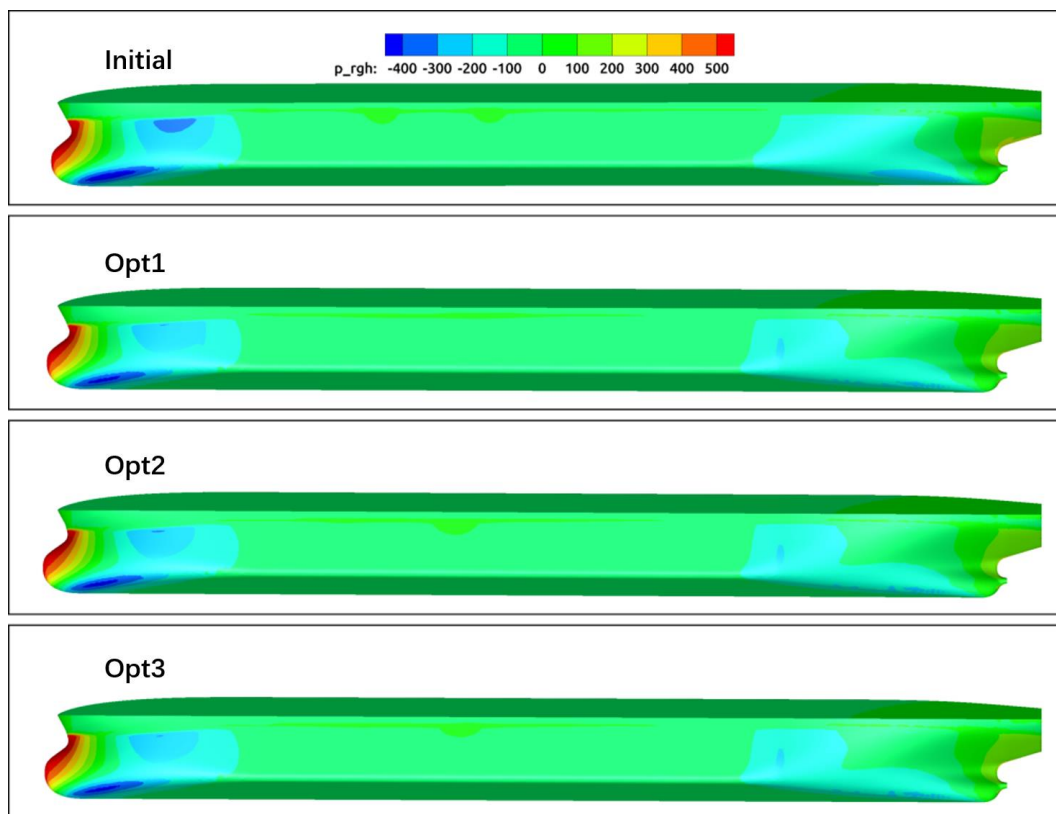


图7-18 JBC 母型船与优化船的压力分布对比

Fig.7-18 Comparison of pressure distribution between initial and optimized hulls

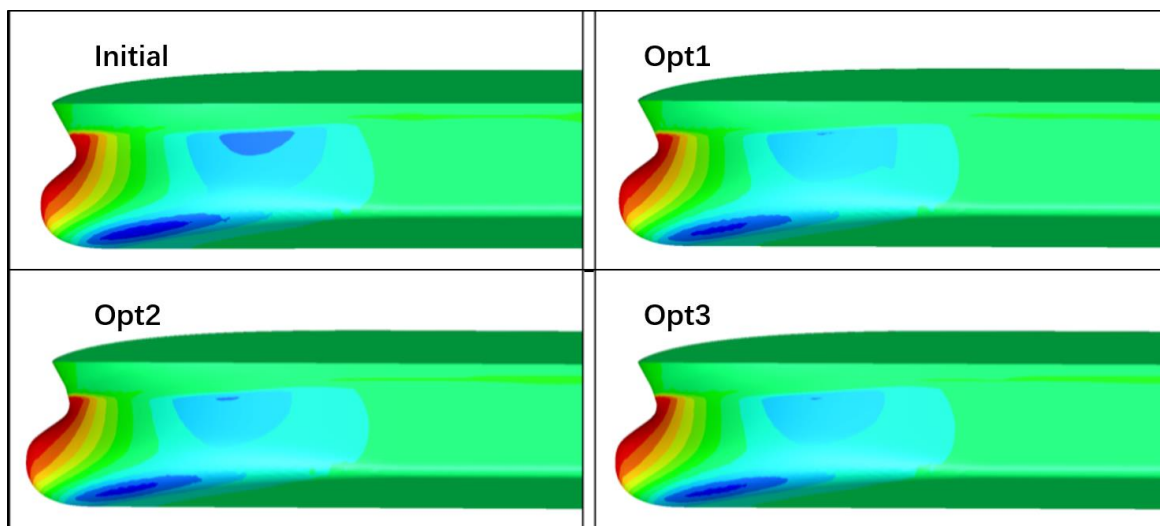


图7-19 JBC 母型船与优化船首部压力分布对比局部放大图

Fig.7-19 Local view of pressure distribution of bow between initial and optimized hulls

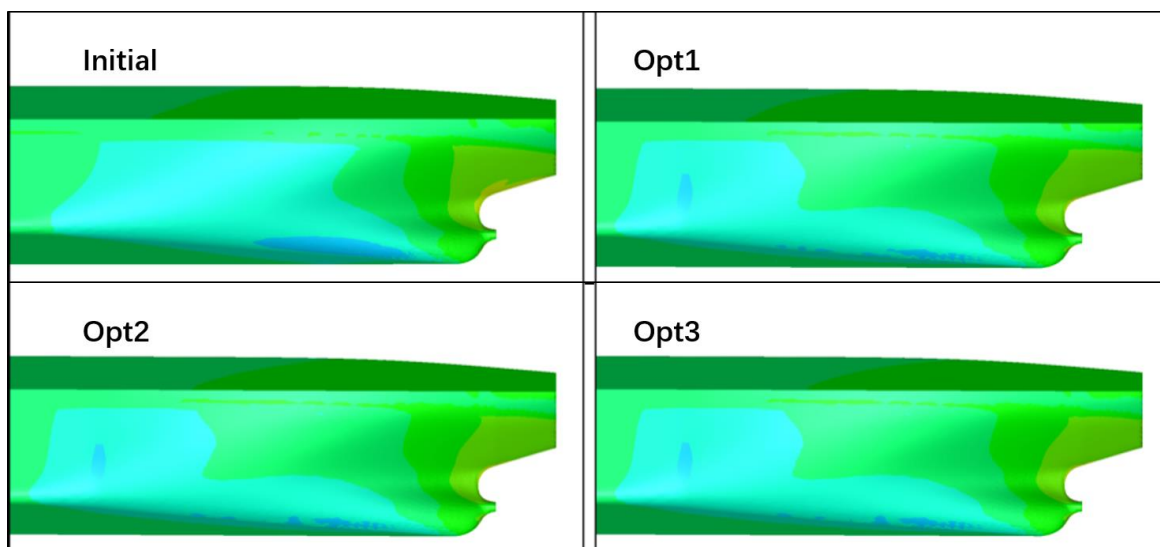


图7-20 JBC 母型船与优化船尾部压力分布对比局部放大图

Fig.7-20 Local view of pressure distribution of stern between initial and optimized hulls

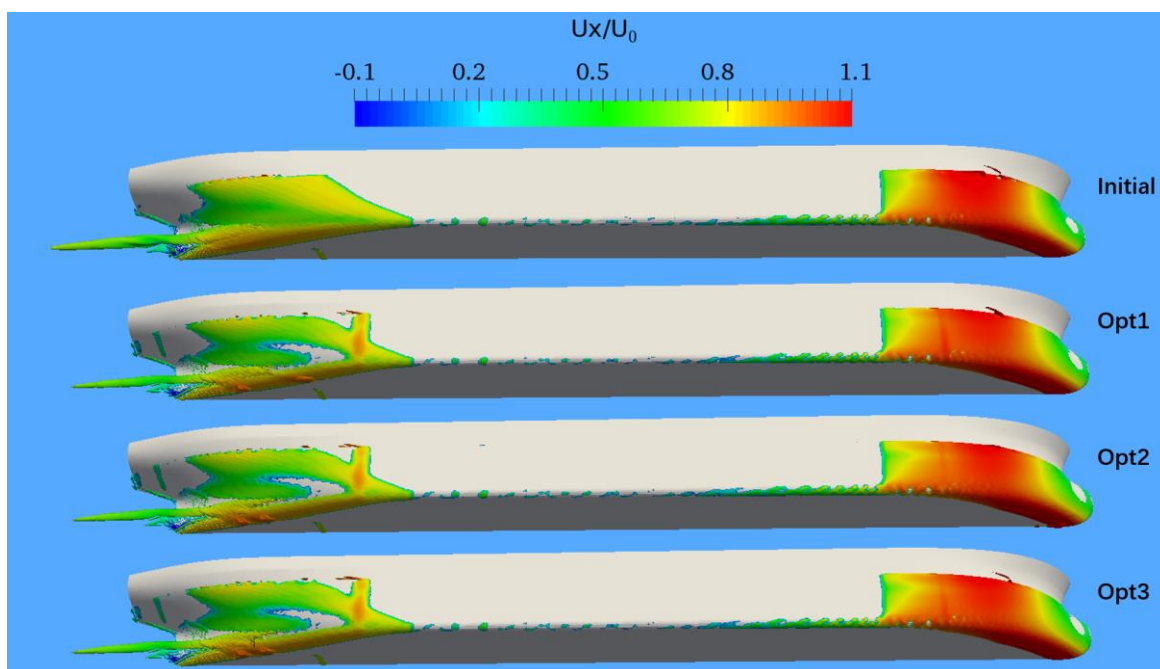


图7-21 优化船与母型船的涡量对比 (Q=14)

Fig.7-21 Comparison of vorticity field between initial and optimized hulls (Q=14)

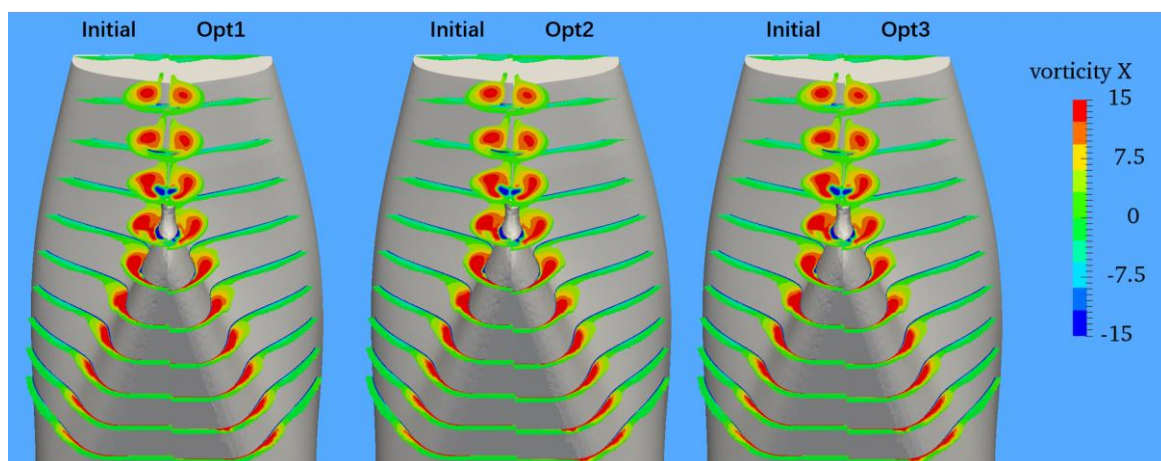


图7-22 优化船与母型船的尾部 x 方向涡量对比

Fig.7-22 Comparison of vorticity field along x-axis between initial and optimized hulls

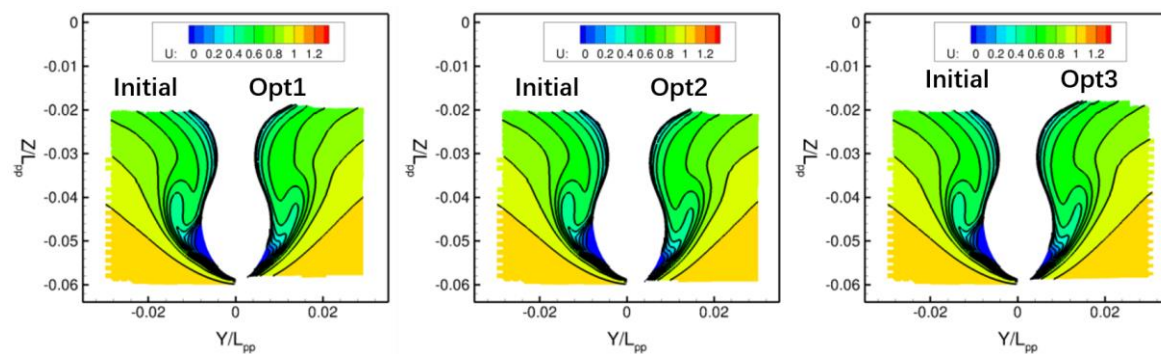


图7-23 在 $x/L_{pp} = 0.9625$ 剖面处伴流场的比较

Fig.7-23 Comparison of wake profile at $x/L_{pp} = 0.9625$

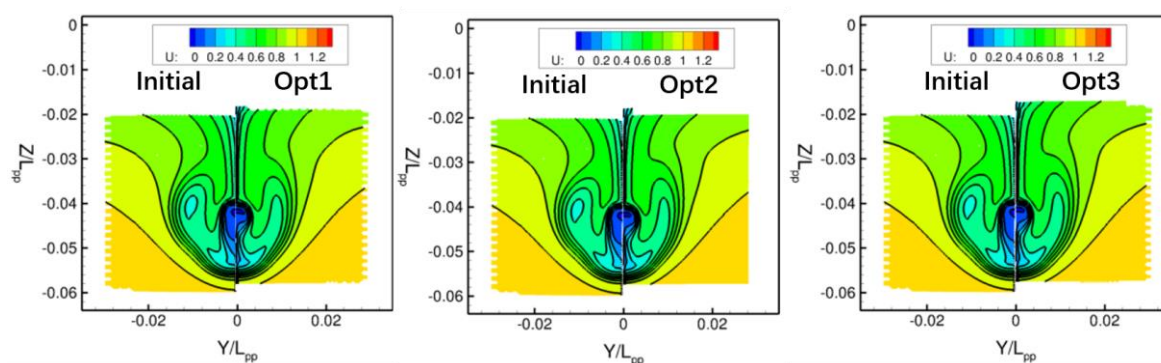


图7-24 在 $x/L_{pp} = 0.9843$ 剖面处伴流场的比较

Fig.7-24 Comparison of wake profile at $x/L_{pp} = 0.9843$

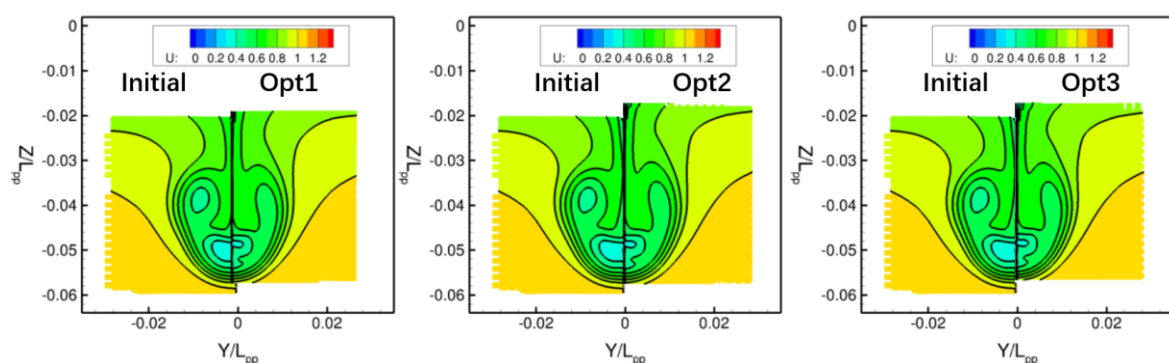
图7-25 在 $x/L_{pp} = 1$ 剖面处伴流场的比较Fig.7-25 Comparison of wake profile at $x/L_{pp} = 1$

图 7-23、图 7-24 及图 7-25 展示了优化船与母型船在桨盘面前、桨盘面处以及桨盘面后三个典型位置的伴流分布。由于三个优化船尾部趋于一致，因此尾部伴流分布基本一致；较母型船而言，伴流分布更加均匀。

综上所述，JBC 母型船本身阻力性能相对优秀，经过优化设计，阻力性能最大提升 3.52%，从初步的灵敏度分析也可以看出，单一参数的变形对于阻力的影响相对较小，选取了多个变形参数后阻力性能得到明显提升，并且可以得知首部较长、较宽些对于阻力性能更优，可以有效降低兴波阻力，而尾部线型朝着船尾提前收缩，能够有效减少涡量，从而减小粘压阻力；而对于伴流性能，尾部线型的改变对其影响显著，提前收缩有利于改善尾部伴流，且优化船尾部线型趋于一致。

7.4 本章小结

本章节主要对 JBC 船进行了船舶首部和尾部形状变形，从而综合优化其总阻力和伴流性能，对于这类低速肥大型船舶的形状优化，由于粘性阻力占比较大，而兴波阻力占比较小，因此考虑粘性影响的优化非常重要，因此采用 RANS 方法进行性能评估显得非常有优势，可以充分考虑粘性以及提取所要关注的局部流场信息。而针对其阻力性能可提升空间较小的情况，采用 EGO 优化方法能够不受初始近似模型精度的限制，更加准确地获取提升空间，在设计空间中找到全局最优点集。



第八章 总结与展望

8.1 论文总结

本博士论文结合粘性流场求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对课题组已有的自主开发的基于势流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 1.0 进行功能模块添加、修改以及完善, 将其升级到 OPTShip-SJTU 2.0, 使得粘流理论在船型精细快速优化设计问题中得以成功应用。

论文紧紧围绕将粘流理论应用于船型优化设计问题, 开展了以下相关工作: 1) 将基于船体 NURBS 曲面表达与经典的变形方法 (FFD、RBF 以及平移法) 耦合, 实现半参数化组合变形功能, 使得船体能够灵活有效地精细变形, 并且支持大变形; 2) 为了实现 CAD/CFD 一体化自动设计, 结合映射法与 OpenFOAM 开源平台自带的 snappyHexMesh 工具实现自动划分船体曲面网格及计算域流场体网格, 在基于船体 NURBS 曲面的半参数化变形与基于粘性 CFD 的水动力性能评估间建立了方便且必要的桥梁; 3) 通过采用试验设计、近似模型以及高效全局优化算法使得基于粘性 CFD 的船型快速优化得到更加广泛地实际应用。为了验证求解器在船型优化设计的实用性, 将该求解器应用于单体船的阻力优化、双体船的阻力优化、低速肥大型船的阻力和伴流性能综合优化以及水下潜器的阻力和伴流性能综合优化问题中, 具体结论如下:

(1) 船型变换从船体 NURBS 曲面表达出发具有巨大优势, 它允许船体曲面对大变形, 通过船体网格自动重生成方法保证了数值计算的网格质量, 解决了从船体三角形或者四边形网格出发进行船型变换有可能导致船体曲面不光顺, 同时船体网格有可能扭曲无法直接用于数值计算的问题。本文基于船体曲面 NURBS 表达的方式进行船型变换, 将其与平移法、RBF 方法及 FFD 方法耦合实现了有效的船型半参数化精细变形, 再通过映射法自动生成船体曲面网格, 可以直接作为 CFD 数值计算的船型输入。此外, 这样的变形方法更加适用于工程实际, 船型设计以通用的 IGES 文件保存图形数据, 其中曲面的表达就采用 NURBS 方法, 因此基于船体曲面 NURBS



的半参数化变形可以实现以母型船 IGES 文件输入, 并以变形船 IGES 文件输出, 省去了重新人工建模的繁琐工作。

(2) 船型变换方法的灵活选择保证了有效设计空间的大小和降低了设计变量(变形参数)的个数。单一采用平移法无法精确控制局部范围的变形, 它更适合全局或者大范围地变形, 而单一使用 RBF 方法进行变形可以很好地控制局部精细变形以及局部线型固定不变, 变形灵活多样, 但如果是较大范围变形涉及的变形参数相对较多, 因此, 将两者结合使用可以获取足够大的设计空间, 同时又能降低设计变量的个数。采用 FFD 方法可以进行局部或全局的船型变换, 可动控制点可以分组选择, 可动的方向也可以分组选择, 这样既有很大的变形空间同时又可以减少变形参数的个数。

(3) 在进行基于 CFD 技术的船型优化之前, 首先要做的是对母型船的 CFD 数值计算可靠性验证, 目的是找到合理的流场计算域网格布局, 它首先要保证 CFD 数值计算结果的准确性, 又要在合理的计算误差范围内考虑将数值计算所需的网格量尽可能减少, 从而使得船型优化设计从单次 CFD 数值模拟的角度降低计算成本和时间。本文通过数值计算结果与试验结果对比以及网格收敛性验证分析两种手段去确定数值计算的网格布局。采用网格收敛性验证分析时, 一般采用三套不同密度的网格, 根据 R_G 的值判断收敛形式, 以及根据网格收敛指数 GCI 确保数值结果受当前网格的疏密程度影响较小。

(4) 采用基于 Kriging 模型的高效全局优化算法(EGO)既可以快速获得全局最优船型, 又使得船型优化设计从数值计算的整体计算量的角度大大缩减计算成本。在船型优化领域虽然有不少学者采用近似模型方法, 可以大大加快优化求解的速度, 但单纯采用近似模型首先必须考虑其精度, 一般通过交叉验证方法去验证, 因为后续优化求解完全依赖近似模型, 如果近似模型局部预报精度较差, 即目标性能的评估不可靠, 则所求最优解经过 CFD 重新计算验证, 目标性能也许并不是最优。因此, 本文采用 EGO 方法进行优化求解, 即将近似模型与遗传算法结合形成新的优化方法, 它不完全依赖于近似模型, 通过单目标或多目标 EI 加点准则(EIM 准则)不断迭代添加新船型更新近似模型并逐代不断探寻到全局最优解。该方法兼顾近似模型的精度提升和全局最优解的探索, 通过该方法可以实现单目标和多目标优化求解。



8.2 研究展望

随着计算机技术以及 CFD 技术的发展,在船海结构物的水动力性能预报方面数值仿真将有望完全替代模型试验,建立数值水池仿真真实海洋环境,精确快速地预报船舶的快速性、耐波性以及操纵性等综合水动力性能,从而带动基于粘流理论的船舶综合水动力性能优化设计。本博士论文主要聚焦在船型变换、近似技术以及优化算法等关键技术的研究以及相关程序开发工作,最终目的形成独立自主的基于粘流理论的船型精细快速优化求解器,并能适用于实际船型的优化设计案例。由于学业时间有限,本博士论文未对最优案例进行模型试验验证,并且优化案例也主要针对船舶或潜艇的静水阻力性能以及尾部伴流性能。尽管如此, OPTShip-SJTU 2.0 求解器实际上已经在船型优化领域甚至是风机、平台优化领域的实际工程有所应用:诸如考虑船-桨匹配的船舶的收到功率的实际优化问题、船舶的阻力和推进性能多目标优化问题、风场中风机的布局优化问题等,下一步可以做更多的应用尝试和验证。

此外,还有以下几点值得继续思考和研究:

(1) 本文 EGO 算法采用的是逐一点,类似“串行”模式,并行 EGO 算法并未开发应用,将来可采用并行 EGO 算法进一步降低优化时长。

(2) 本文采用了 Kriging 模型构建了目标水动力性能与船型变形参数之间的隐藏关系,从而作为优化过程中目标水动力性能的预报工具,未来可以考虑采用机器学习,它既可以直接预报目标水动力性能,又可以直接预报目标船型的整个流场信息。

(3) 考虑巨大的高精度水动力性能计算量,如何用尽可能少的设计变量获取尽可能大的设计空间和如何减小数值计算量仍将是重要的研究方向,则设计空间降维方法,动态近似模型以及基于近似模型的并行优化算法等相关研究将会继续发展。

(4) 考虑数值计算的不确定性,以及真实的复杂海况、船舶运营的不确定性,不确定性多目标优化问题将得到更多的关注。



15008826



参 考 文 献

- [1] Berrini, E., Mourrain, B., Roux, Y., et al. Geometric modelling and deformation for shape optimization of ship hulls and appendages[J]. *Journal of Ship Research*. 2017, **61**(2): 91-106.
- [2] Bolbot, V., Papanikolaou, A. Parametric, multi-objective optimisation of ship's bow for the added resistance in waves[J]. *Ship Technology Research*. 2016, **63**(3): 171-180.
- [3] Campana, E.F., Diez, M., Fasano, G., et al. Initial particles position for PSO, in bound constrained optimization[C]. In *Proceedings of International Conference in Swarm Intelligence*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [4] Campana, E.F., Diez, M., Iemma, U., et al. Derivative-free global ship design optimization using global/local hybridization of the DIRECT algorithm[J]. *Optimization & Engineering*, 2016, **17**(1):127-156.
- [5] Campana, E.F., Fasano, G., Peri, D., et al. Nonlinear programming approaches in the multidisciplinary design optimization of a sailing yacht keel fin[J]. *Pamm*, 2010, **7**(1): 1060601-1060602.
- [6] Campana, E.F., Fasano, G., Pinto, A., Dynamic analysis for the selection of parameters and initial population, in particle swarm optimization[J]. *Journal of Global Optimization*. 2010, **48**(3):347-397.
- [7] Campana, E.F., Fassano, G., Peri, D., et al. Particle swarm optimization: efficient globally convergent modifications[M]. In *Proceedings of III European Conference on Computational Mechanics*. Springer Netherlands, 5-8 June, 2006: 5-8.
- [8] Campana, E.F., Liuzzi, G., Lucidi, S., et al. New global optimization methods for ship design problems[J]. *Optimization & Engineering*. 2009, **10**(4): 533-555.
- [9] Campana, E.F., Stern, F., Diez, M. Hydrodynamic ship design optimization considering uncertainty[C]. In *Proceedings of International Conference on Ships and Shipping Research*. Nov, 2015.
- [10] Cao, H., Wan, D. Development of multidirectional nonlinear numerical wave tank by naoe-FOAM-SJTU solver[J]. *International Journal of Ocean System Engineering*. 2014, **4**(1): 52-59.
- [11] Cao, H., Wan, D. RANS-VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder[J]. *China Ocean Engineering*. 2015, **29**: 183-196.
- [12] Chang, H., Cheng, X., Liu, Z., et al. Sample selection method for ship resistance performance optimization based on approximated model[J]. *Journal of Ship Research*. 2016, **60**(1): 1-13.
- [13] Chen, J., Wei, J., Jiang, W. Optimization of a twin-skeg container vessel by parametric design and CFD simulations[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2016, **8**(5): 466-474.
- [14] Chen, X., Deiz, M., Kandasamy, M., et al. High-fidelity global optimization of shape design by dimensionality reduction, metamodels and deterministic particle swarm[J]. *Engineering Optimization*. 2015, **47**(4):473-494.
- [15] Cheng, X., Feng, B., Liu, Z., et al. Hull surface modification for ship resistance



- performance optimization based on Delaunay triangulation[J]. *Ocean Engineering*. 2018, **153**: 333-344.
- [16] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimisation: NSGA-II[C]. In *Proceedings of Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN VI)*. 2000, 849-858.
- [17] Diez, M., Campana, E.F., Stern, F. Design-space dimensionality reduction in shape optimization by Karhunen–Loève expansion[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*. 2015, **283**:1525-1544.
- [18] Diez, M., Peri, D., Fasano, G., et al. Hydroelastic optimization of a keel fin of a sailing boat: a multidisciplinary robust formulation for ship design[J]. *Structural & Multidisciplinary Optimization*. 2012, **46**(4): 613-625.
- [19] Diez, M., Serani, A., Campana, E.F., et al. CFD-based Stochastic Optimization of a Destroyer Hull Form for Realistic Ocean Operations[C]. In *Proceedings of 14th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST)*, Nantes, France, Sept. 2017: 27-29.
- [20] Diez, M., Serani, A., Campana, E.F., et al. Design space dimensionality reduction for single-and multi-disciplinary shape optimization[C]. In *Proceedings of Aiaa/issmo Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference (MA&O)*. AVIATION 2016, Washington DC, USA. 13-17 June, 2016.
- [21] Diez, M., Serani, A., Campana, E.F., et al. Multi-objective hydrodynamic optimization of the DTMB 5415 for resistance and seakeeping[J]. *VCG*, 2015, 1000: 1.39.
- [22] Diez, M., Volpi, S., Serani, A., et al. Simulation-based design optimization by sequential multi-criterion adaptive sampling and dynamic radial basis functions[M]. *Advances in Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control in Engineering and Sciences*. Springer, Cham, 2019: 213-228.
- [23] Farkas, A., Degiuli, N., Martic, I. Numerical investigation into the interaction of resistance components for a series 60 catamaran. *Ocean Engineering*. 2017, **146**: 151-169.
- [24] Feng, B., Hu, C., Liu, Z., et al. Ship resistance performance optimization design based on CAD/CFD[C]. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Computer Control*. IEEE, 2011: 251-255.
- [25] Feng, B., Liu, Z., Zhan, C., et al. Ship hull automatic optimization techniques research based on CFD[C]. In *Proceedings of International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, Caid & Cd*. IEEE, 2009:663-667.
- [26] Huang, F., Kim, H., Yang, C. A new method for ship bulbous bow generation and modification[C]. In *Proceedings of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Busan, Korea, June 15-20, 2014.
- [27] Huang, F., Wang, L., Yang, C., et al. Hull form optimization of a TriSWACH for reduced drag[C]. *FAST*. 2015.
- [28] Huang, F., Wang, L., Yang, C. A new improved artificial bee colony algorithm for ship hull form optimization[J]. *Engineering Optimization*. 2015:1-15.
- [29] Huang, F., Wang, L., Yang, C. Ship Hull Form Optimization using Artificial Bee Colony Algorithm[C]. *SNAME Maritime Convention*. Houston TX, 2014.
- [30] Huang, F., Yang, C. Hull form optimization of a cargo ship for reduced drag[J].



- Journal of Hydrodynamics. 2016, **28**(2):173-183.
- [31] Jeong, S., Kim, H. Development of an efficient hull form design exploration framework[J]. Mathematical Problems in Engineering. 2013.
- [32] Kandasamy, M., Peri, D., Tahara, Y., et al. Simulation based design optimization of waterjet propelled Delft catamaran[J]. International Shipbuilding Progress. 2013, **60**: 277-308.
- [33] Kim, H.J., Choi, J.E., Chun, H.H. Hull-form optimization using parametric modification functions and particle swarm optimization[J]. Journal of Marine Science & Technology. 2016, **21**(1):129-144.
- [34] Kim, H., Kim, H., Yang, C., et al. Application of a practical multi-objective optimization tool to hydrodynamic design of a surface combatant ship[C]. Grand Challenges in Modeling & Simulation Conference. Society for Modeling & Simulation International, 2009:56-65.
- [35] Kim, H., Yang, C., Chun, H.H. Hydrodynamic optimization of a modern container ship using variable fidelity models[C]. In Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 2009.
- [36] Kim, H., Yang, C., Lohner, R., et al. A practical hydrodynamic optimization tool for the design of a monohull ship[C]. In Proceedings of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference. Anchorage, Vancouver, BC, Canada, 6-11 July, 2008.
- [37] Kim, H., Yang, C., Noblesse, F. Hull form optimization for reduced resistance and improved seakeeping via practical designed-oriented CFD tools[C]. In Proceedings of Conference on Grand Challenges in Modeling & Simulation. 2010.
- [38] Kim, H., Yang, C. Design optimization of bulbous bow and stern end bulb for reduced drag[C]. In Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013.
- [39] Kim, H. Multi-objective optimization for ship hull form design[D]. Fairfax County, USA: George Mason University, 2009.
- [40] Leotardi, C., Campana, E.F., Diez, M. Resistance reduction of a military ship by variable-accuracy metamodel-based multidisciplinary robust design optimization[C]. In Proceedings of Vi International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems. 2015.
- [41] Leotardi, C., Serani, A., Iemma, U., et al. A variable-accuracy metamodel-based architecture for global MDO under uncertainty[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization. 2016, **54**(3):573-593.
- [42] Liu, Q., Feng, B., Liu, Z., et al. The improvement of a variance-based sensitivity analysis method and its application to a ship hull optimization model[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2017, **22**(4): 694-709.
- [43] Liu, X., Wu, J., Wan, D. Multi-objective optimization for a surface combatant using Neumann-Michell theory and approximation model[C]. In Proceedings of the 12th International Conference on Hydrodynamics (ICH2016), Egmond aan Zee, The Netherlands, 2016.
- [44] Miao, A., Wu, J., Wan, D. Hull form optimization based on a NM+CFD integrated method for KCS[C]. In Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods (ICCM2016), Berkeley, USA, 2016.



- [45] Miao, A., Zhao, M., Wan, D. CFD-Based multi-objective optimisation of a S60 catamaran considering demihull shape and separation[J]. *Applied Ocean Research*. 2020,97(102071).
- [46] Papanikolaou, A., Harries, S., Wilken, M., et al. Integrated design and multiobjective optimization approach to ship design[C]. In *Proceedings of International Conference on Computer Application in Shipbuilding*. 2011, 3.
- [47] Pellegrini, R., Leotardi, C., Zaghi, S., et al. Multi-Fidelity Adaptive Metamodel for Ship Hull Performance via CFD[C]. *Numerical Towing Tank Symposium*. 2016.
- [48] Peri, D., Campana, E.F. High fidelity models in the multi-disciplinary optimization of a frigate ship[J]. *Computational Fluid & Solid Mechanics*. 2003: 2341-2344.
- [49] Peri, D., Campana, E.F. High-fidelity models in global optimization[M]. *Global Optimization and Constraint Satisfaction*. Springer Berlin Heidelberg. 2003:112-126.
- [50] Peri, D., Campana, E.F. Multidisciplinary design optimization of a naval surface combatant[J]. *Journal of Ship Research*. 2003, **47**(1): 1-12.
- [51] 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.
- [52] Pinto, A., Peri, D., Campana, E.F., et al. Global optimization algorithms in naval hydrodynamics[J]. *Ship Technology Research*. 2004, **51**(3): 123-133.
- [53] Roache, P.J. *Verification and validation in computational science and engineering*[M]. Hermosa Albuquerque, NM, 1998.
- [54] Sederberg, T.W., Parry, S.R. Free-form deformation of solid geometric models[J]. *ACM Siggraph Computer Graphics*. 1986, **20**(4):151-160.
- [55] Serani, A., Fasana, G., Liuzzi, G., et al. Ship hydrodynamic optimization by local hybridization of deterministic derivative-free global algorithms[J]. *Applied Ocean Research*. 2016, **59**:115-128.
- [56] Serani, A., Leotardi, C., Iemma, U., et al. Parameter selection in synchronous and asynchronous deterministic particle swarm optimization for ship hydrodynamics problems[J]. *Applied Soft Computing*. 2016, **49**:313-334.
- [57] Shen, T., Feng, B., Liu, Z. Design optimization of t modification method based on radial basis function and its application in inverse hull optimization[C]. In *Proceedings of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Busan, Korea, 2014.
- [58] Shen, Z., Wan, D., Carrica, P.M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. *Ocean Engineering*. 2015, **108**: 287-306.
- [59] Shen, Z., Wan, D. RANS computations of added resistance and motions of a ship in head waves[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2013, **23**(04): 264-271.
- [60] Shen, Z., Ye, H., Wan, D. Motion response and added resistance of ship in head waves based on RANS simulations[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*. 2012, **27**(6): 621-633.
- [61] Shen, Z., Ye, H., Wan, D. URANS simulations of ship motion responses in long-crest irregular waves[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. 2014, **26**(3): 436-446.
- [62] Souto-Iglesias, A., Fernandez-Gutierrez, D., Perez-Rojas, L. Experimental assessment of interference resistance for a Series 60 catamaran in free and fixed trim-sinkage



- conditions[J]. Ocean. Engineering. 2012, **53**: 38-47.
- [63] Srinivas, N., Deb, K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation. 1994, **2**(3):221-248.
- [64] Tahara, Y., Campana, E., Peri, D., et al. Single and multiobjective design optimization of a fast multihull ship: numerical and experimental results[J]. Journal of Marine Science & Technology. 2011, **16**(4): 412-433.
- [65] Tahara, Y., Kobayashi, H., Kandasamy, M., et al. CFD-based multiobjective stochastic optimization of a waterjet propelled high speed ship[C]. In Proceedings of the 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 2012.
- [66] Tahara, Y., Peri, D., Campana, E.F., et al. Computational fluid dynamics-based multiobjective optimization of a surface combatant using a global optimization method[J]. Journal of Marine Science & Technology. 2008, **13**(2): 95-116.
- [67] Valorani, M., Peri, D., Campana, E.F. Sensitivity analysis methods to design optimal ship hulls[J]. Optimization & Engineering. 2003, **4**(4): 337-364.
- [68] Volpi, S., Diez, M., Gaul, N.J., et al. Development and validation of a dynamic metamodel based on stochastic radial basis functions and uncertainty quantification[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2015, **51**(2): 347-368.
- [69] Volpi, S., Diez, M., Stern, F. Towards the high-fidelity multidisciplinary design optimization of a 3D composite material hydrofoil[C]. In Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE 2017), Nantes, France, 15-17 May. 2017.
- [70] Wang, J., Lu, Z., Wan, D. Numerical simulations of zigzag maneuver of free running ship in waves by RANS-Overset grid method[J]. Ocean Engineering. 2018, **162**:55-79.
- [71] Wang, J., Wan, D. CFD Investigations of Ship Maneuvering in Waves Using naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. Journal of Marine Science and Application. 2018, **17**(3):443-458.
- [72] Wang, L., Huang, F., Yang, C. Grid generation on NURBS surfaces developed for ship hull form optimization[J]. In Proceedings of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference, Busan, Korea, June 15-20, 2014.
- [73] Wang, L. A NURBS-based computational tool for hydrodynamic optimization of ship hullforms[D]. Fairfax County, USA: George Mason University, 2015.
- [74] Wei, X., Feng, B., Liu, Z., et al. Research on robust optimization for ship hull form design[C]. In Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016.
- [75] Whitley, D. A Genetic Algorithm Tutorial[J]. Statistics & Computing. 1994, **4**(2):65-85.
- [76] Wu, J., Liu, X., Wan, D. Multi-Objective Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Based on Approximation Model[C]. Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, 2016.
- [77] Wu, J., Liu, X., Zhao, M., et al. Neumann-Michell theory-based multi-objective optimization of hull form for a naval surface combatant[J]. Applied Ocean Research. 2017, **63**: 129-141.
- [78] Yang, C., Huang, F., Noblesse, F. Practical evaluation of the drag of a ship for design



- and optimization[J]. Journal of Hydrodynamics. 2013, **25**(5):645-654.
- [79] Yang, C., Huang, F. An overview of simulation-based hydrodynamic design of ship hull forms[J]. Journal of Hydrodynamics. 2016, **28**(6):947-960.
- [80] Ye, H., Shen, Z., Wan, D. Numerical prediction of added resistance and vertical ship motions in regular head waves[J]. Journal of Marine Science and Application. 2012, **11**(4): 410-416.
- [81] Zha, R., Ye, H., Shen, Z., et al. 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.
- [82] Zhan D., Cheng Y., Liu J. Expected Improvement Matrix-Based Infill Criteria for Expensive Multiobjective Optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2017, **21**(06):956-975.
- [83] Zhang, B., Ma, K., Ji, Z. The optimization of the hull form with the minimum wave making resistance based on Rankine source method[J]. Journal of Hydrodynamics. 2009, **21**(2):277-284.
- [84] Zhang, B., Miao, A. The design of a hull form with the minimum total resistance[J]. Journal of Marine Science & Technology. 2015, **23**(5):591-597.
- [85] Zhang, B., Zhang, S., Zhang, H. Optimization design of minimum total resistance hull form based on CFD method[J]. China Ocean Engineering. 2018, **32**(3): 323-330.
- [86] Zhang, B., Zhang, Z. Research on theoretical optimization and experimental verification of minimum resistance hull form based on Rankine source method[J]. International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering. 2015, **7**(5):785-794.
- [87] Zhang, H., Liu, Z., Zhan, C., Feng, B. A sensitivity analysis of a hull's local characteristic parameters on ship resistance performance[J]. Journal of Marine Science & Technology. 2016, **21**(4):592-600.
- [88] 常海超, 李振, 冯佰威, 等. 基于 Pareto 遗传算法的船舶操纵性能多目标优化技术研究[J]. 船海工程. 2008, **37**(5):10-13.
- [89] 常海超. 近似理论在船型优化中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [90] 陈泰文. 基于 CFD 的不同类型船体构型优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [91] 董素贞, 冯佰威, 詹成胜, 等. 基于 CFD 近似模型的船尾型线多目标综合优化[J]. 计算机辅助工程. 2015, **24**(4):13-19.
- [92] 冯佰威, 刘祖源, 谢伟, 等. 船舶 CAD/CFD 集成优化接口开发及应用研究[J]. 船舶工程. 2009, **31**(s1):116-119.
- [93] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 等. CFD 在舰船阻力性能优化中的应用[C]. CAD/CAM 学术交流会议. 2011.
- [94] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 等. 船舶 CAD/CFD 一体化设计过程集成技术研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版). 2010, **34**(4):649-651.
- [95] 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]. 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. 2008.
- [96] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 等. 基于船型修改融合方法的参数化建模技术[J]. 计算机辅助工程. 2010, **19**(4):3-7.
- [97] 冯佰威, 刘祖源, 聂剑宁, 等. 基于 iSIGHT 的船舶多学科综合优化集成平台的



- 建立[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版). 2009, **33**(5):897-899.
- [98] 冯佰威, 刘祖源, 常海超. 多学科设计优化技术在船舶初步设计中的应用[J]. 中国造船. 2009,(04):109-116.
- [99] 冯佰威. 基于多学科设计优化方法的船舶水动力性能综合优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [100] 李胜忠, 倪其军, 赵峰, 等. 大方形系数低速船艏部型线多目标优化设计[J]. 中国造船. 2013, (3):1-10.
- [101] 李胜忠, 赵峰, 杨磊. 基于 CFD 的翼型水动力性能多目标优化设计[J]. 船舶力学. 2010, **14**(11):1241-1248.
- [102] 李胜忠, 赵峰. 基于 Bezier Patch 几何重构技术的船舶球艏型优化设计研究[C]. 全国水动力学学术会议. 2011.
- [103] 李胜忠. 基于 SBD 技术的船舶水动力构型优化设计研究[D]. 中国舰船研究院. 2012.
- [104] 刘晓义, 吴建威, 万德成, 基于遗传算法与 NM 理论的船型优化[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑). 2016, **31**(5): 535-597.
- [105] 刘晓义, 吴建威, 赵敏, 等. 基于 NM 理论和序列二次规划的船型优化设计[C]. 船舶水动力学学术会议, 哈尔滨, 2015.
- [106] 刘晓义. 船体型线数值优化软件 OPTShip-SJTU 优化模块开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [107] 漆小舟. 基于 NURBS 的船型优化软件开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [108] 邱辽原, 谢伟, 姜治芳, 等. 基于参数化 CAD 模型的船型阻力/耐波性一体化设计[J]. 中国舰船研究. 2011, **06**(1):18-21.
- [109] 沈通. 基于径向基函数插值的船体曲面变形方法及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [110] 田原裕介, 西田隆司, 安东润, 等. 1-3 CFD によるタンカー船型の船尾形状最適化: 第 3 報: 自航シミュレータを用いた伝達馬力最小化[J]. 関西造船協会講演論文集, 2000: 123-124.
- [111] 田原裕介, 齋藤泰夫, 姫野洋司. 1-1 CFD によるタンカー船型の船尾形状最適化: 第 1 報: 粘性抵抗最小化[J]. 関西造船協会講演論集, 1998: 1-6.
- [112] 田原裕介, 齋藤泰夫, 松山博志, 等. 1-2 CFD によるタンカー船型の船尾形状最適化: 第 2 報: 伝達馬力最小化[J]. 関西造船協会講演論文集, 1999: 5-8.
- [113] 万德成, 缪爱琴, 赵敏. 基于水动力性能优化的船型设计研究进展[J]. 水动力学研究与进展(A 辑). 2019, **34**(06):693-712.
- [114] 王建华. 基于重叠网格技术的船舶操纵运动直接数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [115] 吴建威, 刘晓义, 万德成. 基于 NM 理论的船型优化技术应用[C]. 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 中国, 南宁, 2015.
- [116] 吴建威. 船体型线数值优化软件 OPTShip-SJTU 船型变换模块开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [117] 杨磊, 李胜忠, 赵峰. 基于 CFD 的船型优化设计内涵及关键技术分析[C]. 船舶



- 力学学术委员会全体会议. 2010.
- [118] 杨磊. 船舶水动力学性能多学科设计优化研究[D].北京: 中国舰船研究院, 2017.
- [119] 詹成胜, 刘祖源, 冯佰威. 基于 CFD 的船舶球首型线自动优化[J]. 船舶力学. 2012, **16**(4):350-358.
- [120] 詹大为. 并行 EGO 算法研究及其应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [121] 张宝吉, 马坤, 纪卓尚. 基于非线性规划法的实用船型首部优化设计方法[J]. 中国造船. 2009, **50**(2):97-105.
- [122] 张宝吉, 马坤, 纪卓尚. 基于非线性规划法的最小阻力船型优化设计[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版). 2010, **34**(2):358-361.
- [123] 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.
- [124] 张宝吉, 马坤. 船体型线最优化设计方法[J]. 大连海事大学学报. 2010, **36**(2):23-26.
- [125] 张宝吉, 马坤. 基于 Rankine 源法的船体型线优化设计[J]. 上海交通大学学报. 2010, **44**(10):1414-1417.
- [126] 张宝吉. 船体型线优化设计方法及最小阻力船型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [127] 张宝吉. 基于混合优化算法的船体型线优化设计[J]. 上海交通大学学报. 2012, **46**(8):1238-1242.
- [128] 赵峰, 程素斌, 杨磊, 等. 水面舰船航行性能 MDO 系统顶层设计研究[J]. 船舶力学. 2012, (11):1257-1266.
- [129] 赵峰, 李胜忠, 杨磊, 等. 基于 CFD 的船型优化设计研究进展综述[J]. 船舶力学. 2010, **14**(7):812-821.



攻读博士学位期间已发表或录用的论文

（一）已发表期刊论文：

- [1] **Miao, A.Q.**, Zhao, M., Wan, D.C. CFD-based multi-objective optimisation of a S60 catamaran considering demihull shape and separation[J]. Applied Ocean Research, 2020,97(102071): 1-20.
- [2] **Miao, A.Q.**, Wan, D.C. Hull form optimization based on a NM+CFD integrated method for KCS[J]. International Journal of Computational Methods, 2020, 2050008-1-2050008-14.
- [3] **缪爱琴**, 万德成. 基于 MOPSO 算法的船舶兴波阻力多目标优化[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2019, 34(03): 291-298.
- [4] 万德成, **缪爱琴**, 赵敏. 基于水动力性能优化的船型设计研究进展[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2019, 34(06): 693-712.

（二）已发表会议论文：

- [1] **Miao, A.Q.**, Wan, D.C. Drag reduction of KCS based on extended FFD method and EGO algorithm[C], In Proceedings of the 9th International Conference on Computational Methods, Rome, Italy, 2018, pp.536-545.
- [2] **Miao, A.Q.**, Chen, T.W., Qi, X.Z., Wan, D.C. Multi-objective optimization design of KCS based on seakeeping performance[C], In Proceedings of the 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, Sapporo, Japan, 2018, pp.639-645.
- [3] **Miao, A.Q.**, Wan, D.C. Ship hull form design using a Kriging-based global optimization algorithm [C], In Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods, Guilin, China, 2017, pp.972-981.
- [4] **Miao, A.Q.**, Wan, D.C. CFD-based hull form optimization for enhancement of resistance and seakeeping performances[C], In Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, 2017, pp. 891-896.
- [5] **缪爱琴**, 刘晓义, 吴建威, 万德成, 基于 Neumann-Michell 理论的双体船水动力学性能多目标优化[C], 船舶力学学术会议文集, 武汉, 2016.



15008826



攻读博士学位期间参与的科研项目

- [1] 上海东方学者特聘教授跟踪计划项目：《海洋结构物非线性水动力学问题的数值模拟研究》，批准号：2013022，2014 年 1 月至 2016 年 12 月。
- [2] 教育部长江学者特聘教授资助项目：《船舶与海洋工程数值水池数值方法研究与软件开发》，批准号：T2014099，2015 年 1 月至 2019 年 12 月。
- [3] 国家自然科学基金项目：《海洋结构物大幅度运动剧烈流场数值模拟方法研究》，批准号：51379125，2014 年 1 月至 2017 年 12 月。
- [4] 工信部数值水池创新专项项目：涡激振动/涡激运动子系统软件开发，批准号：2016-23/09，2016 年 1 月至 2019 年 12 月。
- [5] 国家自然科学基金项目：海上浮式风机流固耦合标准问题建模研究，批准号：51411130131，2014 年 1 月至 2016 年 12 月。
- [6] 国家自然科学基金重大项目：《大型深海结构水动力学理论与流固耦合分析方法—深海浮体/系缆/立管运动的耦合动力分析方法》，批准号：51490675，2015 年 1 月至 2019 年 12 月。



15008826



致 谢

博士生涯即将结束，落笔之际，感慨颇丰。攻读博士学位的道路是曲折漫长的，幸运的是这一路走来得到了老师们的谆谆教导和亲朋的不断鼓励，真的非常感激你们的支持。

首先要非常感谢我的博士生导师万德成教授。博士生涯的科研工作能够顺利展开到完成离不开万老师的耐心指导。这五年来，有受到质疑，有过低谷，有想过放弃，但万老师告诉我们有问题及时解决问题，多和组里同学沟通交流，埋下头，沉住气，耐得住寂寞守得见花开，天道酬勤，水到渠成。我记得有很多次跟万老师说我的基础薄弱，可能做不好，万老师都会跟我说：“你先做，没有做你就否定自己，谁还不是一点一点做好的？”因此在每一次的鼓励下，我坚持了！虽然过程中遇到了很多问题，但是学会了及时沟通交流和有效地推进课题。此外，万老师还给我们提供了非常优良的科研条件：安静的办公室环境，高性能的计算机硬件，优秀的科研团队等。生活中也积极鼓励我们锻炼身体，提高身体和心理素质。

然后，我想感谢另外两位老师在博士课题上给予的帮助和指导，首先是美国乔治梅森大学杨驰教授，多次聆听杨教授有关船型优化方向的讲座并进行深入探讨，为我博士课题的展开和完成提供了很好的方向指引；另外一位是上海交通大学水下工程研究所的赵敏老师，他在我博士课题的开展和学术论文的撰写方面都提供了很大的帮助，并且在我灰心丧气时不厌其烦地鼓励我。因此，非常感谢两位老师！

此外，我要感谢在上海交通大学一起学习和生活过的朋友们。感谢优化小组成员吴建威、刘晓义、刘鑫旺、王晋楷在科研上的帮助和支持。感谢王建华博士、赵伟文博士在学习上的指导和帮助。感谢课题组端木玉师姐、程萍师姐、罗天师妹、张冠宇师妹、安筱婷师妹、王秋雯师妹、郭浩师妹在学习以及生活上的帮助和鼓励。感谢同届陈翔、刘正浩、庄园在学习和科研上的帮助。感谢已毕业的同学夏可、付博文、艾勇、饶成平、何东亚、孙晨光、李思明、谢康迪、许璐荣、陈凯杰、武磊、余安正等。同时还要感谢现在课题组的刘聪、任振、张晨亮、何佳伟、文潇、邓迪、余安正、武磊、张晓嵩、李政、李乐宇、刘志强、马春卉、陈松涛、卢泽宇、吴定坤等。感谢大家在课题组生活和学习各方面的相互帮助和配合，我科研工作的完成离不开大家的愉快合作和积极帮助。感谢课题组的朱政老师在日常生活中的全力帮助，事无巨细



让我感到了课题组的温暖。希望已经毕业的师兄师姐师弟师妹们工作蒸蒸日上，生活和和美美；希望课题组内的师弟师妹们能够在科研道路上顺利前行，勇攀高峰。

同时非常感谢与我一起并肩攻博的朋友：杨小岩，李达特，阳杰，刘正浩。我可以“肆无忌惮”地跟你们分享喜悦，你们也总可以“想方设法”地鼓励失落难过的我，感谢你们五年来的陪伴。此外，还要感谢我最亲爱的两位朋友戴雯雯和陈明敏，你们即便不在我身边，也时常通过微信或者电话来关心我，这份友情已经不知不觉转化成了亲情，不管我有什么事情，只要我需要，你们都能第一时间出现，力挺我。除此，感谢其他所有关心我的亲朋好友，这里不再一一列出你们的名字，但你们的默默支持和关心总能让我在徘徊的日子里找回前进的动力。

最后，我要感谢我的家人一直以来对我默默付出的一切。感谢父母，尤其我的父亲缪华平先生，感谢你们无私的生养之恩，感谢你们多年的教育之恩，在你们身上我理解了辛勤劳作、坚持不懈的意义，看到了面对生活的积极态度，我会带着你们的希望继续前行，希望你们把身体健康放在第一位。我为生活在这样的家庭而感到荣幸！



15008826

上海交通大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：缪爱琴

日期：2020 年 11 月 20 日

上海交通大学 学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于 ☒ 公开论文

☐ 内部论文，☐ 1 年/☐ 2 年/☐ 3 年 解密后适用本授权书。

☐ 秘密论文，____ 年（不超过 10 年）解密后适用本授权书。

☐ 机密论文，____ 年（不超过 20 年）解密后适用本授权书。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：缪爱琴

日期：2020 年 11 月 20 日

指导教师签名：Francis Lucien Noblesse

日期：2020 年 11 月 20 日



15008826

上海交通大学 博士学位论文答辩决议书



015010910031

姓 名	缪爱琴	学号	015010910 031	所在 学科	船舶与海洋工程
指导教师	Francis Lucien Noblesse	答辩 日期	2020-11- 13	答辩 地点	木兰楼 A1004
论文题目	基于粘流理论的船型优化软件开发与应用研究				

投票表决结果: 5/5/5 (同意票数/实到委员数/应到委员数) 答辩结论: ☒ 通过 ☐ 未通过
评语和决议:

该论文紧密围绕降低能效设计指数 (EEDI) 的迫切需求, 开展了基于粘流理论的船型优化软件开发与应用研究, 选题正确, 具有重要的科学意义和工程应用前景。

论文开发了基于船体 NURBS 曲面的变形和基于近似模型的高效全局优化算法 (EGO) 等功能模块, 使得粘流数值模拟可以高效地应用于船型优化设计中, 开发升级了船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0, 并应用于潜艇、水面单体船、高速双体船、低速肥大船等阻力和精细流场的综合优化, 效果显著。论文创新点如下:

(1) 开发了基于船体 NURBS 曲面的半参数化变形模块, 以及船体曲面网格自动重生成模块, 实现了船舶 CAD/CFD 一体化设计。

(2) 提出了单目标和多目标船型优化的高效全局优化新算法, 有效实现了船型优化设计问题全局解的快速准确求解。

(3) 形成了完全自主可控的基于粘流理论的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 2.0, 可实现船舶全流场快速性优化。

论文综述全面, 研究内容丰富, 数据翔实可靠, 结论正确, 创新性强。论文写作结构完整、层次分明、逻辑性强、表达规范, 是一篇优秀的博士学位论文。论文工作表明, 该生已掌握本学科坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识, 具有很强的独立从事科研工作的能力。

该生答辩过程中表述清晰, 回答问题正确。答辩委员会充分讨论后, 经过无记名投票表决, 全票 (5 票) 一致同意通过缪爱琴的博士学位论文答辩, 并建议授予其工学博士学位。

2020年11月13日

答辩委员会成员签名	职务	姓名	职称	单位	签名
	主席	邹早建	教授	上海交通大学	
	委员	王金宝	研究员	中国船舶集团公司第七〇八研究所	
	委员	袁洪涛	研究员	上海外高桥造船有限公司	
	委员	张怀新	教授	上海交通大学	
	委员	朱仁传	教授	上海交通大学	
	秘书	王建华	助理研究员	上海交通大学	