



上海交通大学硕士学位论文

基于 OPTShip-SJTU 的
面向快速性的船型优化

硕 士 研 究 生：陈泰文

学 号：116010910172

导 师：万德成教授

申 请 学 位：工程硕士

学 科：船舶与海洋工程

所 在 单 位：船舶海洋与建筑工程学
院

答 辩 日 期：2019 年 1 月

授予学位单位：上海交通大学



16004312



Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University
for the Degree of Master

HULL FORM OPTIMIZATION FOR RAPIDITY BASED ON OPTSHIP-SJTU

Candidate:	Taiwen Chen
Student ID:	116010910172
Supervisor:	Prof. Decheng Wan
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Naval Architecture and Ocean Engineering
Affiliation:	School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering
Date of Defence:	Jan, 2019
Degree-Confering-Institution:	Shanghai Jiao Tong University



16004312



基于 OPTShip-SJTU 的面向快速性的船型优化

摘 要

随着能源供应的日趋紧张,节能减排问题正逐步受到人们的重视。船舶能效设计指数 (Energy Efficiency Design Index, EEDI) 标准对各类船舶的线型设计提出了新的挑战, 船型优化技术成为亟待攻克的关键技术。目前, 船型优化研究对象多集中于中高速船舶, 关于低速肥大船、多体船的线型优化研究甚少。因此, 本文对不同类型船舶的线型优化问题进行了探究, 为各类船舶的线型优化问题提供参考。

本文采用了课题组自主开发的船型优化求解器 OPTShip-SJTU, 使用平移法和自由变形 (Free Form Deformation, FFD) 方法进行船体几何重构, 分别采用 Neumann-Michell 理论、RANS 方法和叠模方法对不同优化问题中的重构船型的水动力性能进行评估, 使用全局单目标优化算法 GA 和多目标优化算法 NSGA-II 求解最优船型, 同时采用 Kriging 近似模型代替数值计算完成优化过程中的性能评估。

为了验证船型优化求解器的可靠性, 本文首先对中高速船 KCS 标模进行了前体线型优化, 分析验证了 Kriging 近似模型的可靠性, 以及 NM 数值方法用于中高速船阻力性能优化的可靠性和高效性。最优船型总阻力降幅明显, 结合流场分析存在“峰谷”交错叠加的现象, 从而产生有利兴波干扰。

随后针对低速肥大船, 对 JBC 标模进行了艏部和艉部线型优化。艏部线型优化的减阻效果并不明显, 结合流场对其原因进行了分析, 同时发现 JBC 艉部存在明显的流动分离。于是对艉部线型分别进行了单目标和多目标优化, 采用叠模方法进行性能评估, 有效缩短了计算时长和优化周期, 并通过优化结果验证了叠模方法的可靠性。单目标最优船型总阻力降幅明显, 结合流场分析艉部的流动分离得到明显改



善，从而减小了粘压阻力；多目标优化结果表明其中一个优化船型不仅总阻力减小，而且桨盘面伴流品质也得到大幅改善。

最后针对多体船，对某高速错列四体船的片体线型以及片体间横向、纵向间距同时进行了优化，最优船型片体间产生了有利的兴波干扰，使得兴波阻力大幅下降。

本文对不同类型船舶的线型优化问题探究表明，OPTShip-SJTU 具有良好的适用性和可靠性，并且为各类实际船舶的线型优化问题提供了一定的指导和借鉴。

关键词：船型优化、OPTShip-SJTU、低速肥大船、多体船、多目标优化



HULL FORM OPTIMIZATION FOR RAPIDITY BASED ON OPTSHIP-SJTU

ABSTRACT

With the increasing tension of energy supply, energy conservation and emission reduction are gradually attracting people's attention. EEDI brings new challenge to hull form design for various types of ship, and hull form optimization has become a key technology to be overcome urgently. At present, most hull form optimization is taken for high-speed ship, and little for low-speed full ship and even multi-hull ship. Therefore, hull form optimization for various types of ship is explored in this thesis, providing reference for related research.

An in-house ship hull form optimization solver, OPTShip-SJTU, is taken in this thesis. The geometry of hull form is modified by shifting method and Free Form Deformation (FFD) method. Neumann-Michell (NM) theory and RANS method are taken in different optimization problem to evaluate the objective functions for ship hydrodynamics. Single-objective optimization algorithm, Genetic Algorithm (GA), and multi-objective optimization algorithm, NSGA-II, are utilized to solve the optimal hull. And Kriging approximation model is taken to evaluate ship performance instead of numerical method in the optimization process.

In order to verify the reliability of the hull form optimization solver, the fore body optimization for KCS is carried out in this thesis. The results verify the reliability of Kriging approximation model, as well as the reliability and efficiency of NM numerical method for resistance optimization for medium or high speed ship. The total resistance of optimal hull decreases obviously, and there exists superposition of crest and trough in the flow field, causing favorable wave-making interference.

Then, the fore body and aft body optimization for JBC, a typical



low-speed full ship, are successively carried out. The results of single-objective optimization show that the flow separation near the stern is obviously improved, causing less vortex and great reduction of viscous pressure resistance. And the results of multi-objective optimization show that not only the total resistance greatly reduces, but also the wake quality of the propeller disk significantly improves.

Finally, hull form optimization for a high-speed quad-hull ship is carried out, not only the demihull form, but also the transverse and longitudinal spacing, are modified at the same time. And the results show that wave-making resistance decrease obviously due to the favorable wave-making interference between the optimal demihull.

The achievements obtained in this thesis show that OPTShip-SJTU has excellent applicability and reliability. And the results provides some guidance and reference for the hull form optimization problems for various types of actual ships.

KEY WORDS: Hull form optimization, OPTShip-SJTU, Low-speed full ship, Multi-hull ship, Multi-objective optimization



目 录

基于 OPTSHIP-SJTU 的面向快速性的船型优化	I
摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 课题的背景及意义	1
1.2 相关研究与进展	3
1.2.1 国外研究进展	3
1.2.2 国内研究进展	11
1.3 本文主要工作	14
第二章 船型优化方法	17
2.1 船体线型优化软件 OPTShip-SJTU	17
2.2 船型变换方法	18
2.2.1 平移法	18
2.2.2 FFD 方法	19
2.3 水动力性能评估方法	22
2.3.1 Neumann-Michell 理论	22
2.3.2 RANS 方法	22
2.3.3 叠模方法	23
2.4 优化算法	23
2.4.1 单目标遗传算法	23
2.4.2 多目标遗传算法	24
2.5 近似技术	24
2.5.1 试验设计方法	24
2.5.2 Kriging 近似模型	25
2.6 本章小结	26
第三章 中高速船线型优化	28
3.1 引言	28
3.2 优化对象描述	28
3.3 性能评估的可靠性验证	29



3.3.1 计算区域及网格划分	29
3.3.2 数值计算结果的模型试验验证	30
3.4 KCS 前体线型优化	32
3.4.1 优化问题的定义	32
3.4.2 优化结果及分析	36
3.5 本章小结	43
第四章 低速肥大船线型优化	46
4.1 引言	46
4.2 优化对象描述	46
4.3 性能评估的可靠性验证	47
4.3.1 计算区域及网格划分	47
4.3.2 数值计算结果的模型试验验证	48
4.4 JBC 艏部线型优化的尝试	50
4.4.1 优化问题的定义	51
4.4.2 优化结果及分析	54
4.5 JBC 艉部线型优化	58
4.5.1 叠模方法评估 JBC 阻力的可行性	58
4.5.2 阻力单目标优化	58
4.5.3 阻力&伴流多目标优化	70
4.6 本章小结	78
第五章 多体船线型优化	80
5.1 引言	80
5.2 优化对象描述	80
5.3 计算域网格划分	81
5.4 单航速优化	81
5.4.1 优化问题的定义	81
5.4.2 优化结果及分析	83
5.5 多航速优化	87
5.5.1 优化问题的定义	87
5.5.2 优化结果及分析	88
5.6 本章小结	89
第六章 结论与展望	92



6.1 结论	92
6.2 研究展望	93
参 考 文 献	94
致 谢	102
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文	104



16004312



第一章 绪论

1.1 课题的背景及意义

近几十年来，国际航运业的蓬勃发展对船舶排水量的要求越来越高，大功率大能耗的船舶逐步问世。然而随着能源供应的日趋紧张和近些年来油价的飞涨，越来越高的运营成本开始困扰着各大船东。与此同时，随着人类环保意识的不断觉醒，环保理念逐渐深入人心，人们在节能减排问题上达成共识，在船舶领域更是如此。

鉴于此，国际海事组织（International Maritime Organization, IMO）提出了船舶能效设计指数（Energy Efficiency Design Index, EEDI）^[1]。EEDI 的提出对设计和建造船舶提出了更高的要求，除了满足传统设计制造的基本使用要求，具有良好的技术性能外，还必须低于规定的能耗水平，这显然对船舶设计提出了新的挑战。

根据中国船级社在会议上提交的有关我国 EEDI 基线的估算结果，我国正在营运的三大主力船型中，只有很小的比例能够符合 IMO 的 EEDI 标准。为了我国海洋强国战略的纵深推进，提高船舶能效水平、降低船舶能耗，使船舶适应于 EEDI 标准，对船型进行优化设计是最有效途径。

船型设计是提升船舶性能的重要手段，由于船型设计水平对船舶性能有重要影响，所以一直都是船舶设计中极为重要的一环，也是亟待解决的关键技术。传统的船型设计方法主要采用母型船改造法，顾名思义，该方法以现有的优秀船型作为母型船，并根据基本的船舶原理、流体力学知识以及船舶设计经验进行手工改型，之后通过模型试验验证改型后船舶性能的提升。这种设计模式存在很多缺陷：首先这种设计方式严重受限于工程师的设计经验和母型船的型线数据库，很难取得创新的设计成果，而且对于缺乏经验的船型设计起来会非常的困难；其次即使是经验丰富的设计师也需要通过循环往复的估算校核才能得到符合条件的结果，设计成本高，设计周期长；最重要的是，最终设计方案理论上也只是“可行解”，而不是“最优解”。

随着计算机技术的迅猛发展，计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）得到了广泛应用，也逐渐被引入到船型设计领域。然而，大多数做法也只是使用 CFD 技术来预报给定船型的性能，这种做法实质上只是用 CFD 技术来部



分替代模型试验，并未真正摆脱传统船型设计模式所采用的“选型”设计带来的局限性。

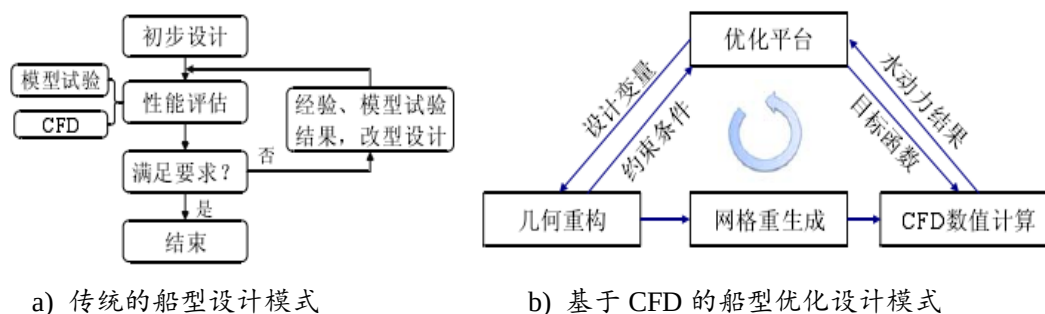


图 1-1 船型设计模式对比图^[3]

Fig.1-1 Comparison between the traditional ship hull form design model and optimization model

要解决根本问题，就必须“逆向”思维，即通过船舶性能来“反向”引导船型朝着性能最优的方向进行重构。这种船型设计模式将 CFD 技术真正融入到优化设计过程中，对船舶性能进行数值评估后，利用最优化技术自动寻优，并以寻优结果作为船型重构的导向，结合几何重构技术自动生成新的船型，然后对新船型性能再次评估并重复寻优和重构的过程，如此循环，最终将获得性能最优的船型，这种设计模式在国际上称之为 SBD（Simulation Based Design）技术^[2]，也可以称之为船型优化设计模式，该模式原理如图 1-1 b)所示。

随着 CFD 技术的逐渐成熟，数值模拟精度和效率的提升，船型优化体现出巨大的优越性和空前的发展前景，诸多基于 CFD 的船型优化工具已相继在欧美、日韩等造船技术先进的国家得到了应用，并取得了良好的成果。我国已然成为世界造船大国，并开始向世界造船强国的远大目标挺进，这意味着我们必须在造船技术上进行跟进甚至是创新。在船型设计领域，我国也开始紧跟国际技术前沿，逐步摆脱传统的船型设计模式，诸多科研单位和学者开始积极探索船型优化技术，并初步研发了相关的船型优化工具，为船型优化技术的发展奠定了坚实的基础。

但是实践才是检验真理的唯一标准，目前国内的船型优化技术仍处于初步研发阶段，自主研发的船型优化软件还未能达到国外商业软件的水平，因此亟需大量的实际应用和验证。船型优化过程中涉及到的诸多关键技术，如几何重构技术、水动力性能评估技术、近似技术以及最优化技术，要想在实际应用中合理地运用这些关键技术并有效地发挥出船型优化的优势，仍需要大量的实践和探索。

对于不同类型的船舶，例如中高速船（舰船、集装箱船等），低速肥大船（散货船），甚至是双体船、多体船等等，存在着不同的技术难题，如何在约束条件下进行合理的几何重构才能得到性能更优良的最优船型，采用何种数值计算方法能



既准确又高效地评估其水动力性能，如何确保近似技术的可靠性，如何有效地求解最优船型而避免陷入局部最优，这些问题不仅会影响船型优化的效率，还会直接影响船型优化的效果。对于不同类型船舶，必须具体问题具体分析，从实践中提取宝贵经验，有针对性地采取相应策略，并为其他同类型或不同类型船舶的线型优化问题提供经验和指导。

1.2 相关研究与进展

1.2.1 国外研究进展

在以往，模型试验是船舶性能预报评估的主要手段，研究人员采取统计回归分析方法，对大量模型试验结果进行整理分析，得出船舶性能随船型参数的变化规律，并制成图谱或曲线图，据此来对船型进行改型设计。

随着最优化理论不断发展，以及图谱分析方法自身的局限性，后者开始逐渐被前者取代。最初，人们结合已有的经验公式，通过求解最优船型参数来设计优化船型。这种基于模型试验和经验公式的船型优化设计方法，简单、快捷、稳定，然而缺点也显而易见，成本高、限制多、缺乏创新。

将 CFD 技术引入船型优化过程中，彻底打破了模型试验的诸多局限性，经过十多年的发展，其成本低、周期短、灵活性高等优越性得到了越来越丰富的体现，引起了国内外诸多学者的关注，并在各个层面对基于 CFD 的船型优化技术开展了研究。

上世纪 90 年代末，研究者们开始结合基于势流理论的兴波阻力预报方法和最优化理论，以减小兴波阻力为目标，对中高速船的线型优化开展了广泛的研究，该阶段的研究重点是简单优化算法和兴波阻力数值计算的高效结合^[5-11]。

Harries 等^[10]（1998）以最小总阻力为目标，对某液化天然气船进行了优化设计，他们采用的优化方法为分步优化法，使用经验公式和 CFD 技术先后进行优化，为后来基于 CFD 的船型优化技术开辟了道路。

Huan 等^[11]（1998）开发了一种基于梯度的优化算法，并应用该方法进行了某高速船的线型优化，其中兴波阻力采用势流方法（非线性自由表面流动）预报，结果表明了这种基于梯度的优化算法十分的高效。之后，许多研究者^[12-17]亦纷纷效仿，采用基于梯度的优化方法，以兴波阻力为目标函数，并用势流兴波理论对兴波阻力进行预报，对不同船体进行了型线优化设计。

Tahara 等^[18]（2000）选取若干参数来表达船体几何，并通过修改这些参数来



控制船体变形，采用势流方法计算兴波阻力，用序列二次规划方法（SQP）对 DTMB5415 的船艏、声纳罩进行了优化设计。

Peri 等^[19]（2001）利用贝塞尔曲面方法对某油轮球艏进行几何重构（图 1-2），在初始船体曲面上叠加一块贝塞尔曲面，利用贝塞尔曲面的变形使船体曲面发生变形（这种方法比较适合于局部船型的几何重构），采用势流方法和经验公式计算总阻力，分别采用三种不同的优化算法——变梯度法（CG）、序列二次规划（SQP）、最速下降法（SD）求解最优船型，试验结果表明总阻力大幅下降。

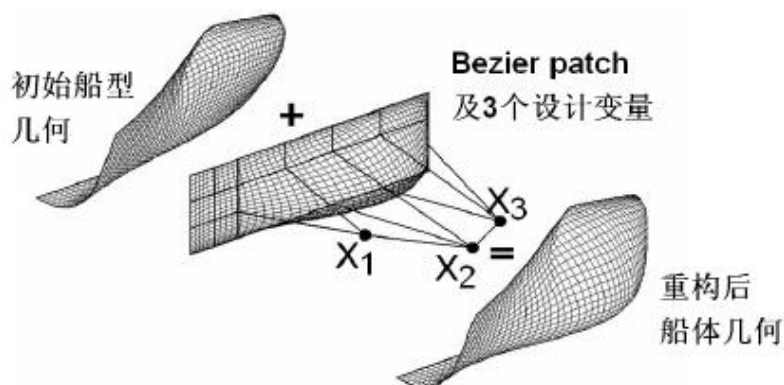


图 1-2 贝塞尔曲面方法重构球鼻艏^[19]
Fig.1-2 Bezier patch method modify bow

Valorani、Peri 和 Campana^[20]（2002）为了提高优化过程的效率，开发了 SEM（Sensitivity Equation Methods）和 AM（Adjoint Methods）算法，减少了计算资源的消耗，降低了优化成本，提高了优化效率。

Campana、Peri 等^[21]（2002）采用贝塞尔曲面方法对某水面舰船球艏进行几何重构，采用势流方法计算水面舰船艏部兴波波幅，并以艏部兴波波幅为优化目标进行了优化设计。有意思的是，他们分别对初始方案、专家改型方案以及优化得到的最优方案进行了模型试验，结果表明：专家改型方案的艏部波幅仅减小了 30%左右，而最优方案则减小了 70%以上（图 1-3），这正是船型优化的魅力所在！

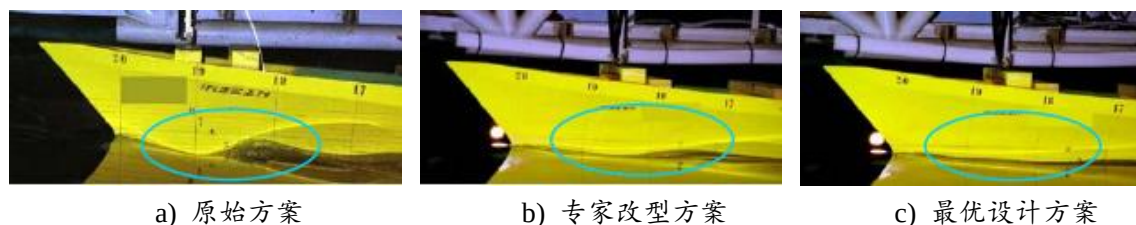


图 1-3 专家改型方案和最优设计方案艏部兴波对比^[21]
Fig.1-3 Comparison of wave height between expert modified hull and optimal hull



随着最优化理论不断发展, 基于随机搜索思想的优化算法开始得到船型优化研究人员和相关学者的关注。基于随机搜索的算法只需要目标函数值就能进行寻优, 而不需要求解目标函数的梯度, 因此对于无法求解目标函数梯度的问题也能有效解决; 另外, 基于梯度的优化算法可能会收敛到局部最优, 而基于随机搜索的优化算法属于全局优化算法, 可有效避免陷入局部最优解。搜索的范围可以由使用者根据实际情况自行设定, 其基本流程往往都是由初代的随机群体开始, 根据一定的评价准则, 逐代搜索并演变为更优的群体, 经过一定的迭代次数收敛到最优群体, 目前工程实践中应用最为广泛的主要是遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)^[22]和粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)^[23]。

船舶的性能并不是单一的, 随着船型优化的发展, 单一目标的优化问题显然不够满足实际工程需求, 多目标优化问题也开始被人们关注, 基于 Pareto 排序 (图 1-4) 的多目标遗传算法成为研究的重点。Srinivas 和 Deb^[24]提出一种可以获得非支配解集的多目标遗传算法, 非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic algorithms, NSGA), 该算法对两两个体之间的支配关系进行排序, 并对目标函数进行赋值。之后 Deb^[25]对 NSGA 方法进行了一些改进, 并提出了 NSGA-II, 该方法取得了丰硕的成果, 成为当前工程应用中最为常见的多目标遗传算法。

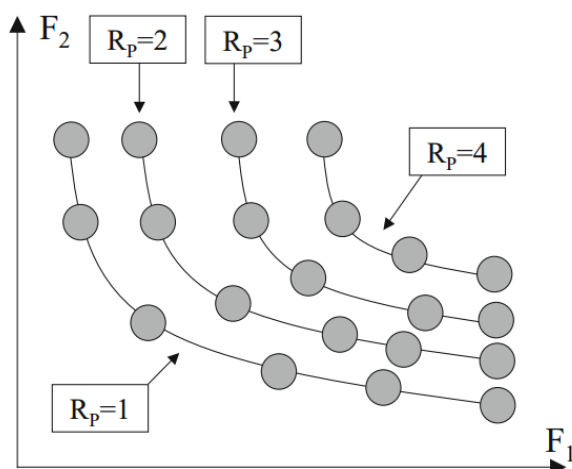
图 1-4 Pareto 排序^[24]

Fig.1-4 Pareto ranking

Peri 等^[26] (2003) 采用多目标遗传算法对舰船 DTMB5415 进行了优化设计, 以总阻力和船体运动幅值作为优化目标, 采用贝塞尔曲面方法对船体几何进行重构, 最终得到了一组非支配解集和优选船型。在此基础上, Pinto 等^[27]又采用粒子群算法对某集装箱船进行了型线优化设计。



Tahara、Peri 和 Campana 等(2003 ~ 2008)^[28-32]合作分别采用两种方法进行几何重构,一种是基于 CAD 的方法,一种是贝塞尔曲面方法,以阻力性能和耐波性能为目标进行优化,其中总阻力采用 RANS 方法评估,纵摇和垂荡值采用切片理论评估。此外,他们还研究了变精度优化策略,该策略将整个优化过程分成两个阶段:首先采用低精度数值求解器对目标性能进行近似评估,在这个阶段采用全局优化算法获取最优解所在的大致范围;锁定最优解的大致范围之后,再采用高精度数值求解器对目标性能进行更为精确的评估,在这个阶段采用基于梯度的局部优化算法求解最优。变精度优化策略缩短了优化设计周期,提高了优化设计效率,同时保证了最优解的求解精度,使得计算资源得到了更有针对性的利用,为解决优化效率与优化精度之间的矛盾提供了一种不错的思路。

在这一阶段,优化算法逐渐从基于梯度的局部优化算法向基于随机搜索的全局优化算法演变,优化问题也逐渐从简单的单目标优化发展到复杂的多目标优化。除此之外,不少研究者也对不同的船型变换方法进行了研究,寻求更加灵活实用的船体几何重构方法。

Harries (2006)^[33]采用叠加融合方法对集装箱船前半体进行了几何重构,这种方法将多个母型船进行线性叠加,通过调整权重因子来进行船体几何重构(图 1-5),这种船体几何重构方法的设计变量较少,但很难获取足够多的不同船型,变形多样性较差;Harries 以总阻力最小,装载量最大,吃水最小为优化目标,改变叠加融合系数重构并评估了 3500 个新船型,通过多目标优化算法得到一系列优化船型解集,并对其中一个优化船型进行了进一步的数值计算分析和模型试验验证。

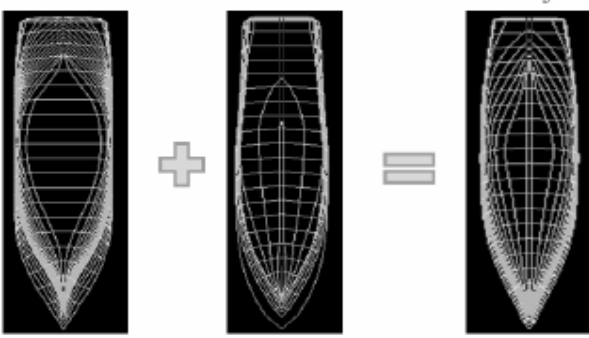
$$w_1 X_1 + w_2 X_2 = X_{modified}$$

$$w_1 + w_2 = 1$$

图 1-5 叠加融合法重构船体几何^[33]

Fig.1-5 Morphing approach modify hull geometry

Kim (2008)^[34]对参数化模型方法进行了研究,这种方法通过特殊的参数化修正函数对部分船体形状参数进行修正从而改变船型,这种方法的设计变量较少,但比较依赖修正函数,变形不够灵活。Kim 采用这种方法对船模 KVLCC2 的横剖面面积曲线形状、水线形状以及球鼻艏形状进行了修正(图 1-6),以不同航速的总阻力作为目标进行了多目标优化。

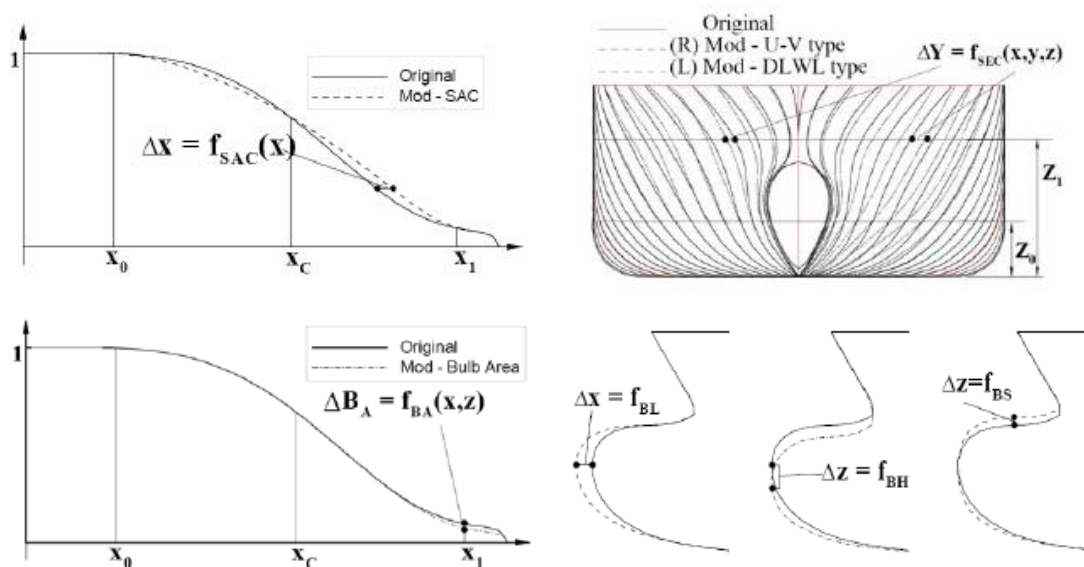


图 1-6 参数化模型方法修正 KVLCC2 形状^[34]
Fig.1-6 Parametric modeling approach modify KVLCC2 hull form

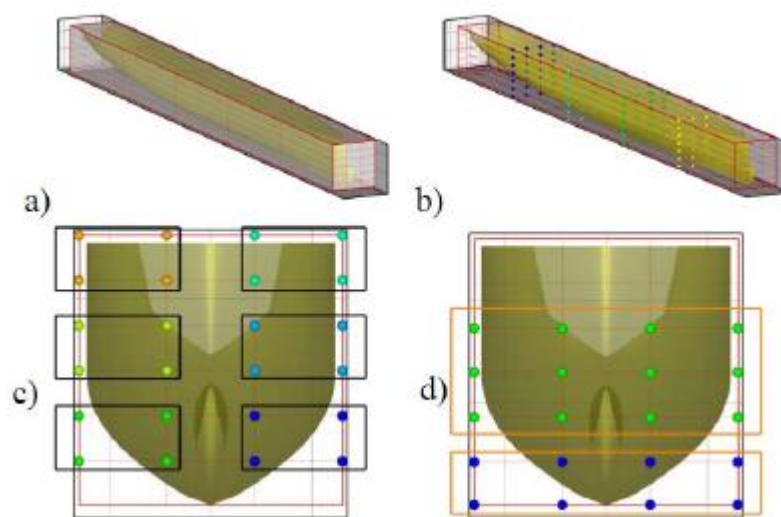


图 1-7 FFD 方法对 Delft 双体船的片体进行几何重构^[35]
Fig.1-7 FFD method modify Delft demihull form

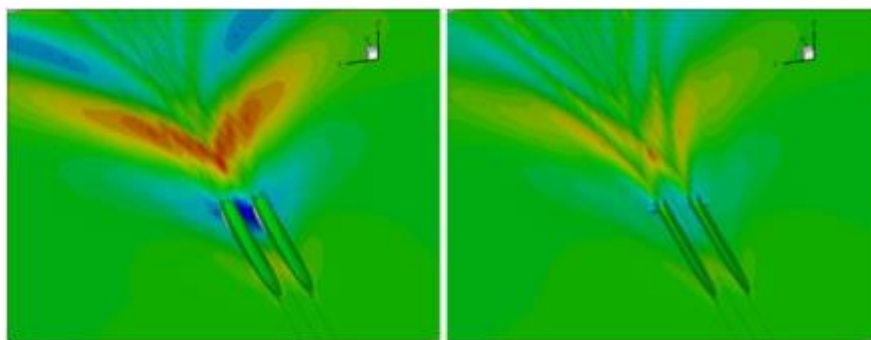
图 1-8 Delft 双体船优化方案与原始方案兴波对比^[35]

Fig.1-8 Comparison of wave height of Delft catamaran between original and optimal design

Peri 和 Tahara (2006 ~ 2008)^[35-36]采用 FFD 方法实现了船体的几何重构,这种方法通过控制点的移动来实现船型重构,并采用移动控制点的移动量对船体几何进行参数化表达,这种方法非常的灵活,不仅适用于船体几何的整体重构,也可以用于船体的局部重构,但设计变量相对较多。Tahara 采用 FFD 方法对 Delft 双体船的片体进行了几何重构(图 1-7),并以波浪中的总阻力和运动幅值为目标开展了多目标优化设计,最后对优化结果进行了模型试验,试验结果表明其中一个最优方案的优化效果十分明显(图 1-8),总阻力下降了 9.3%,垂荡运动幅值和横摇运动幅值分别下降了 50.5%和 27.4%。

Kim、Yang 等^[37-38](2008 ~ 2009)对基于 NURBS 曲面的船体几何重构方法进行了详细研究,该方法通过 NURBS 控制点对船体曲面直接进行重构,能够给出优化船型的 IGES 格式文件,而且对于大幅度变形有很好的适应性,该方法较为复杂,且设计变量较多。Kim 等^[39](2010)采用 Lackenby 方法对 S60 船型进行整体几何重构,修改了船体横剖面面积曲线,同时采用基于 NURBS 曲面的径向基函数插值方法对船体局部进行几何重构,首先在 S60 艏部生成一个球鼻艏(图 1-9),然后对球鼻艏进行二次重构,并以三个不同航速下的总阻力为目标进行了多目标优化,总阻力由兴波阻力(基于 NM 理论的高效求解器)和摩擦阻力(ITTC

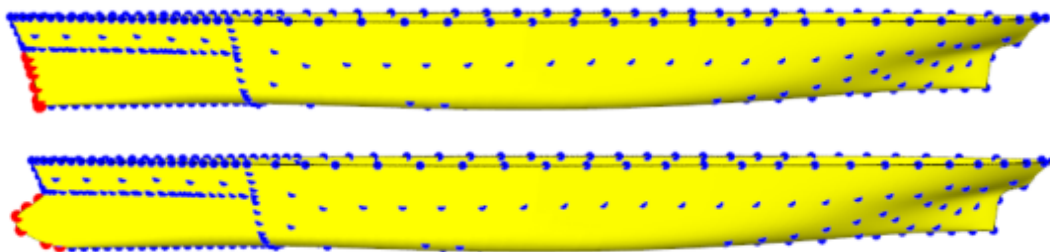
图 1-9 基于 NURBS 曲面方法生成球鼻艏^[39]

Fig.1-9 NURBS-based method generate bow

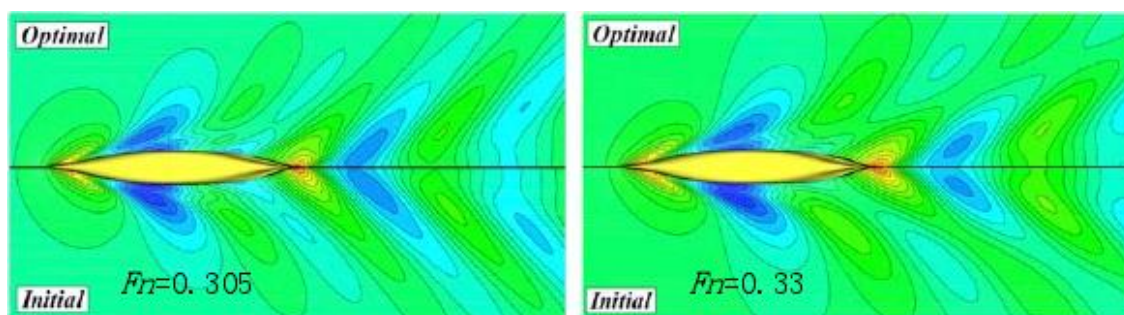
图 1-10 S60 母型船与优化船兴波对比^[39]

Fig.1-10 Comparison of wave pattern between original hull and optimal hull

公式计算)相加得到。模型试验结果表明在其中一个航速下($Fr = 0.305$),基于 Lackenby 的整体几何重构方法总阻力的收益为 2.12%,基于局部几何重构方法总阻力的收益为 9.04%,基于整体与局部相结合的几何重构方法总阻力收益为 11.65%(图 1-10),而且验证了采用基于 NM 势流得到的兴波阻力与 ITTC 摩擦阻力公式相加求和的方法来评估总阻力对于中高速船总阻力优化来说是可行的。

为了解决优化过程中数值计算的响应时间过长的的问题,近似技术开始受到研究者们的关注,并逐渐被引入到船型优化领域。Peri 和 Campana^[40-41](2008~2009)对不同近似模型的近似能力分别进行了研究,拥有良好近似能力的近似模型不仅能在一定程度上确保优化结果的精确度,还能极大程度地提升优化过程的效率。

Campana 等^[42-45](2009~2012)针对 S175 集装箱船顶浪航行时的垂荡 RAO,对不同优化算法进行了研究,旨在减少目标函数的高精度评价次数。优化过程涉及 6 个设计变量,FILLED 优化算法仅进行了 320 次高精度评价,而 DDFPSO 及 DIRECT 优化算法则需要 600 次高精度评价才能达到相同降幅,因为 FILLED 算法本身嵌套了局部搜索步骤,所以整体收敛速度更快。

Kim、Yang 等^[46](2010)对某集装箱船进行船型优化,采用基于 NURBS 曲面的 RBF 方法进行几何重构,同时采用变精度模型代替大量的高精度数值模拟,该模型采用一个校正函数对低精度数值模拟的输出结果进行校正,该校正函数通过处理高精度和低精度数值模拟的输出结果而得到。

近十年来,随着船型优化技术的日趋成熟,国外相关研究者开始对更加多样的更为复杂的实际船型的优化设计及其工程应用问题开展了研究。

Kim、Yang 等^[47](2013)对某无球艏和球艏的护卫舰进行了船型优化,得到三种类型的优化船型,包括仅有球艏,仅有球艏以及同时含有球艏和球艏的新船型,并对三种类型的优化船进行了试验验证,证明了新船型阻力性能较母型船有不同程度的优化。



Tahara 等^[48] (2014) 考虑到船舶实际航速的随机性, 对随机性优化问题 (Stochastic Optimization Problem) 进行了研究: 鲁棒性优化 (Robust Design Optimization, RDO)、基于可靠度的优化 (Reliability-Based Design Optimization, RBDO) 以及基于可靠度的鲁棒性优化 (Reliability-Based Robust Design Optimization, RBRDO)。RDO 考虑目标函数值的随机性, RBDO 考虑约束函数值的随机性, 而 RBRDO 则同时考虑目标函数和约束函数值的随机性。Tahara 通过给船舶航行时的实际速度 (Fr) 定义一个概率密度函数来作为随机输入, 并以波浪中的总阻力和运动幅值的期望和方差作为目标, 对 Delft 双体船进行了多目标线型优化设计, 优化结果表明考虑实际环境的随机影响具有显著优势, 能够解决更为实际更为复杂的优化问题。之后 Dies 等^[49-54] (2015 ~ 2017) 在此基础上, 考虑实际海况, 包括航速、海况等级、浪向等因素的随机性, 基于势流理论对 DTMB5415 进行了多目标鲁棒性优化, 目标函数为总阻力和运动幅值的期望和方差; 同时运用 Karhunen-Loeve Expansion (KLE) 方法将设计空间维度从 27 降到 11 个, 即设计变量的个数, 使设计空间更具针对性, 同时降低了优化的复杂度, 提高了优化效率。

Copped é 等^[55] (2018) 将网格细分技术与自由变形方法相结合, 避免利用 FFD 方法时可能出现的网格变形过大, 导致局部船体网格质量下降, 出现不合理的船型的现象, 通过网格细分技术对待变形区域进行曲面细分, 使得改型船更真实、光滑。

Tahara 等^[56] (2018) 针对船舶的阻力性能和伴流性能, 将全部设计变量划分为两大类, 研究了两种性能分别与哪些船型参数的相关性较大, 之后分别进行了船型优化, 结果表明将设计变量“分解”可以在获取较明显的优化效果的同时提高优化效率。

总而言之, 国外学者对于船型优化设计已经进行了不同层次多方位的深入研究: 性能评估方法从通过模型试验回归经验公式到 CFD 数值模拟, 从简单高效的势流理论到考虑粘性的 RANS 方法; 优化算法从基于梯度的局部优化算法到基于随机搜索的全局优化算法, 甚至是全局与局部混合的优化策略, 避免陷入局部最优的同时提高了搜索效率; 优化目标也从单一目标发展到多目标, 从求解单一的最优方案到求解一系列 Pareto 解集; 船体几何重构方法从最初的贝塞尔曲面法、叠加融合法到更加灵活实用的参数化模型方法、FFD 方法和基于 NURBS 曲面的 RBF 方法等; 近似技术从简单的响应面模型到稳健的 Kriging 模型、RBF 模型, 并加入有效的试验设计方法, 再到高精度与低精度结合的变精度模型, 甚至对高



维设计空间进行降维，在保证一定的求解精度的同时提高优化效率；从简单的船型 Wigley, S60，到舰船 DTMB 5415，集装箱船 KCS 等，再到散货船，油船，甚至是双体船，三体船等多体船；船舶性能优化从单一的阻力性能到同时考虑阻力性能，伴流、推进性能，以及耐波性能，操纵性能等综合性能；船型优化问题从确定性优化问题到随机性优化问题，考虑了航速、波浪参数等因素受环境影响的随机性，具有重要的实际工程意义。

1.2.2 国内研究进展

自船型优化技术在国外得到蓬勃发展，并取得良好成果后，国内学者也开始跟踪国际技术前沿，开展了相关研究。

卢晓平等^[57]（2003）对某穿浪双体船片体的横剖面进行修改，采用线性兴波阻力理论计算双体船的兴波阻力，并采用变分法求解最优横剖面，结果表明兴波阻力减小了 15% 左右。在此基础上，卢晓平等^[58]（2004）又根据该线性兴波阻力理论对某高速三体船的兴波阻力公式进行了推导，根据推导出的计算公式对该高速三体船片体间的兴波干扰规律进行了研究，并绘制出兴波阻力曲线，将简单枚举方法和等值线图谱方法相结合，对三体船的片体布局进行了优化，结果表明片体间产生了有利的兴波干扰，兴波阻力大幅下降。

程成^[59]（2007）利用 iSIGHT 将 CFD 和 CAD 商业软件集成在一起，以推进效率和压力系数为目标，对螺旋桨进行了几何构型优化。

叶茂盛^[60]（2007），张宝吉和马坤等^[61-63]（2009，2010）为了得到阻力性能优良的实用船型，通过修改船体表面型值来重构船体几何，并直接以型值为设计变量，采用 Michell 积分法和 Rankine 源法计算兴波阻力，以兴波阻力为目标，保持排水量变化不大，分别采用 NLP 和 GA 优化算法对球艏进行了优化设计。此后，张宝吉等^[64]（2010）介绍了一种混合优化算法，这种方法采用顺序混合的方式，将全局优化遗传算法和局部优化非线性规划算法混合在一起，即先采用 GA 对初始设计空间进行全局搜索，找到近似最优解，也就是最优解所在的区域后，再利用 NLP 进行局部寻优。这种混合算法不仅改善了优化求解的收敛速度，同时也改进了优化结果。

常海超等^[65]（2008）利用现有的成熟的船舶操纵性经验公式，以船舶主尺度等参数作为设计变量，以船舶操纵性的一些指标，如相对回转直径、直线稳定性指数和无因次初转期为目标进行了多目标优化。

冯佰威、刘祖源等^[66-72]（2009 ~ 2010）采用叠加融合法对船体几何进行重构，



采用 SHIPFLOW 软件计算兴波阻力,采用 Holtrop 方法估算粘压阻力和摩擦阻力,以总阻力为目标,采用遗传算法对某集装箱船球艏进行了型线优化设计,并用 iSIGHT 优化平台将船体几何重构模块(CAD)和船舶性能评估模块(CFD)集成起来。

邱辽原等^[73](2011)采用叠加融合法对某油船进行几何重构,同样采用 iSIGHT 优化平台将参数化船型生成技术与船舶性能计算模型集成在一起,以船舶阻力和耐波性为目标,采用多目标遗传算法求解 Pareto 前沿,试验结果表明总阻力降低了 3%。

李胜忠等^[74](2010)将 CFD 商业软件 FLUENT、优化算法和几何重构技术集成在一起构建了基于 CFD 的水动力性能优化设计平台,并以 NACA0024 翼型为优化对象,采用贝塞尔曲面方法对翼型进行几何重构,以翼型所受升力阻力比和尾流场的品质作为目标,采用 NSGA-II 算法进行了多目标优化设计。

李胜忠等^[75-77](2010~2013)采用 FFD 方法进行几何重构,采用叠模方法求解总阻力,采用 PSO 优化算法求最优解,对某散货船的整体和局部进行了线型优化,结果验证了叠模方法的高效性和可行性,并取得了不错的减阻效果(图 1-11)。

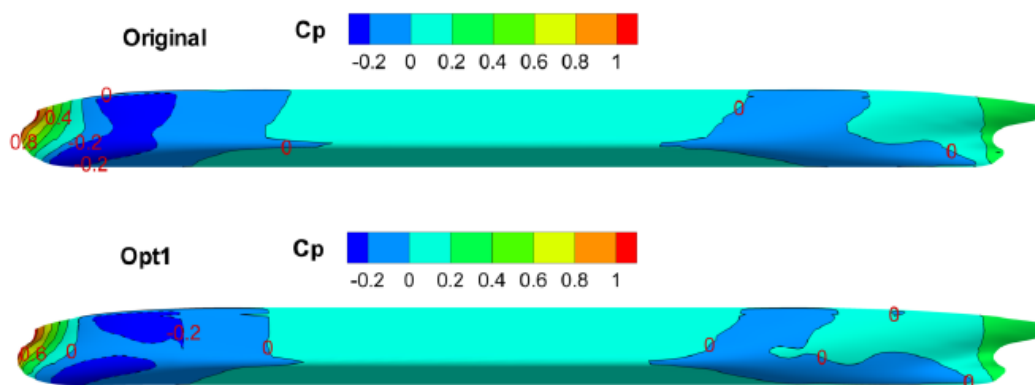


图 1-11 某散货船优化前后压力对比^[75]

Fig.1-11 Comparison of pressure between original hull and optimal hull

钱建魁,毛筱菲等^[78](2012)利用 iSIGHT 将 CFD 工具、CAD 工具、响应面模型、组合优化算法集成在一起,并采用 Lackenby 方法重构船型,利用 SHIPFLOW 计算兴波阻力,以及 ITTC (1957) 公式计算剩余阻力,以总阻力为目标,构建响应面近似模型,并利用进化遗传算法与二次序列规划相结合的二阶组合优化方法在近似模型上进行寻优,最终优化方案的总阻力降低了 9.42%。

常海超等^[79](2013)对船型优化中样本点选取方法对近似模型精度的影响进



行了研究，比较了拉丁超立方试验设计和大样本点均匀试验设计，并针对近似模型的精确度和优化效率相矛盾的问题对样本点的选取数量进行了探究。

董素贞等^[80]（2015）以 KCS 的总阻力和船尾桨盘面伴流均匀度为优化目标，采用 RBF 方法修改船尾，采用均匀试验设计方法选择 200 个样本点，采用商业软件 SHIPFLOW 进行数值计算，之后用人工神经网络构建近似模型，通过多目标遗传算法得到最优解集。数值计算结果表明优化船型在阻力基本不变的情况下，尾部伴流品质得到较大改善。

吴建威、刘晓义等^[81-85]（2014 ~ 2017）分别对各种船体几何重构方法和各类优化算法、近似技术进行了研究，通过 C++ 程序实现了包含各类方法的船型变换模块和优化模块，将这两个模块与包含 Neumann-Michell (NM) 理论和 RANS 方法在内的水动力评估模块集成到一起，初步建立了一套船体线型优化软件 OPTShip-SJTU，分别采用了不同的几何重构方法（平移法、RBF 方法、FFD 方法）以及不同的优化算法（基于梯度的序列二次规划算法 SQP、基于随机搜索的遗传算法 GA、多目标遗传算法 NSGA-II），结合近似技术（优化拉丁超立方试验设计和 Kriging 模型），对 Wigley 船模、S60 船模、DTMB5415 船模（图 1-12）等进行了单目标和多目标优化设计，并取得了良好的成果。

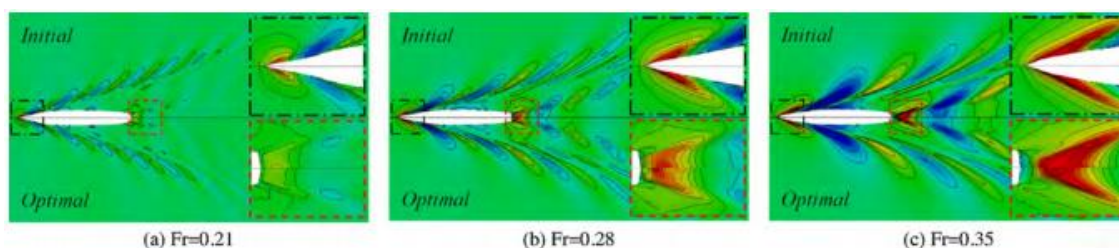


图 1-12 DTMB5415 优化前后兴波对比^[85]

Fig.1-12 Comparison of wave pattern between original hull and optimal hull

缪爱琴等^[86]（2016）使用船型优化软件 OPTShip-SJTU 对 Delft 372 双体船的片体型线以及两片体间距进行了多目标优化，采用 FFD 方法进行几何重构，采用基于 NM 理论的数值方法计算兴波阻力，结果表明优化方案在 $Fr = 0.5$ 和 0.7 时兴波阻力系数各减小了 8.9% 和 6.4%；缪爱琴等^[87]（2017）还使用了多目标粒子群算法（Multi Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO），对 KCS 进行了两个航速下的优化设计，优化结果表明 $Fr = 0.2$ 时兴波降幅明显；另外，缪爱琴等^[88-89]（2017）还对优化策略进行了研究，初始选取少量样本点构建 Kriging 近似模型，然后采用 Expected Improvement (EI) 方法搜索目标函数值最优和近似模型误差最



大的区域，在这些区域追加样本点进行寻优，并逐步收敛到最优解，这种优化策略不仅可以保证近似模型的精度，还能提高优化效率。

总的来说，国内船型优化相关学者已开始跟踪国际前沿，对不同关键技术也进行了研究，并取得了初步的成果：船型变化方法包括贝塞尔曲面方法，叠加融合法，参数化模型方法，RBF 方法以及 FFD 方法等；水动力性能评估方法主要有经验公式，切片理论，势流理论，RANS 方法等；优化算法包括 NLP, GA, NSGA-II, PSO, MOPSO 等；近似技术有响应面模型，神经网络模型，Kriging 模型等。

然而，不难看出，国内船型优化较国外船型优化发展而言，还存在以下局限：大多数研究依托于成熟的商业软件，或者利用商业软件进行二次开发或集成；主要研究对象集中于中高速船舶，对于其他不同船型，如低速肥大船、多体船等尚缺乏研究；优化目标较为单一，多数以兴波阻力或总阻力为目标开展优化设计，对于船舶综合水动力性能的优化较少。

1.3 本文主要工作

本论文在课题组已初步建立的船体线型优化软件 OPTShip-SJTU 的基础上，对部分模块和方法进行完善和验证，并对中高速船、低速肥大船以及多体船等不同类型船舶进行线型优化。

本文工作的主要特色如下：

①国内大多数研究依托于成熟的商业软件，或者利用商业软件进行二次开发或集成。本文采用了课题组自主开发的船型优化求解器 OPTShip-SJTU，对部分模块和方法进行了完善和验证，逐步形成了一套可靠且实用的船型优化软件。

②国内船型优化的研究对象主要集中于中高速船舶，关于其他类型船舶的研究较少。本文先后对中高速船、低速肥大船以及多体船进行了线型优化，对不同类型船舶的线型优化问题进行了探究，针对不同的船型尝试了不同的线型优化区域，采用了不同的几何重构方式，使用了不同的数值方法评估船舶性能，并对不同类型船舶较关注的性能进行了单目标或多目标优化，为各类实际船舶的线型优化问题提供了一定的指导和借鉴。

③中高速船一直都是主要的研究对象，为了验证船型优化求解器的可靠性，本文首先对中高速船 KCS 标模进行了前体线型优化，分析验证了 Kriging 近似模型的可靠性，以及 NM 数值方法用于中高速船阻力性能优化的可靠性和高效性。最优船型总阻力降幅明显，结合流场分析存在“峰谷”交错叠加的现象，从而产生有利兴波干扰。



④低速肥大船兴波阻力占比很小，通过减小兴波阻力的方式对低速肥大船来说收益不大，相反降低粘压阻力才是更合理的减阻思路。势流方法对粘压阻力的变化并不敏感，因此只能通过粘流方法评估阻力，这无疑会增加计算时长并延长优化周期；其次，低速肥大船方形系数较大，平行中体较长，几何重构难度更大，因此低速肥大船的线型优化一直是船型优化的难点。本文以典型低速肥大船 JBC 标模作为优化对象，首先尝试了艏部线型优化，发现减阻效果并不明显，结合流场对其原因进行了分析，同时发现 JBC 艏部存在明显的流动分离。随后又对 JBC 艏部进行了线型优化，采用叠模方法评估阻力，有效缩短了计算时长和优化周期，并通过阻力成分和流场分析验证了叠模方法的可靠性。单目标最优船型总阻力降幅明显，结合流场分析艏部的流动分离得到明显改善，从而减小了粘压阻力。

⑤影响低速肥大船快速性的不仅仅是阻力，推进性能对快速性的影响也非常大，尤其是肥大船型，艏部收缩剧烈，会造成艏部伴流不均匀，影响螺旋桨的推进效率。本文对总阻力最小的单目标最优船型的桨盘面伴流进行了分析，发现优化方案在内半径处桨盘面无因次轴向速度反而减小，而且径向“波动”和周向“波动”均变大，说明伴流品质反而变差。因此本文又以总阻力最小和桨盘面伴流不均匀度最小为目标进行了多目标优化，结果表明其中一个优化船型不仅总阻力减小，而且桨盘面各半径处的伴流均增大，且径向、周向分布都比原始方案更为均匀，阻力和伴流均有明显改善，综合节能效果更好。这也为今后开展更加复杂的综合性能优化打下了坚实的基础。

⑥与单体船不同之处在于，多体船存在片体布局的问题，片体间的兴波干扰对兴波阻力有很大影响，因此在多体船线型优化中，不仅要考虑单个片体的重构，更需要考虑片体间距的重构。本文对某高速错列四体船的片体线型以及片体间横向、纵向间距同时进行了优化，单目标结果表明最优船型片体间产生了有利的兴波干扰，使得兴波阻力大幅下降；多目标优化的 Pareto 前沿形状为“凸形”，优化方案 opt1 和 opt2 的计算结果表明，opt1 在 $Fr = 0.4$ 时兴波明显减小，在 $Fr = 0.5$ 时兴波反而增大，而 opt2 则恰好相反，说明 opt1 适合低航速，opt2 适合高航速，与 Pareto 结果吻合。

本文各章节主要内容概括如下：

第一章介绍了课题的研究背景与意义，对船型优化关键技术的国内外研究进展进行了梳理和分析，对国内船型优化技术的一些不足进行了阐述，并针对部分问题制定了本文的主要研究目标，最后对本文的框架内容和特色工作进行了阐述。

第二章主要对船型优化求解器 OPTShip-SJTU 的框架和各个模块进行了简要



介绍，并对本文所使用的一些方法进行了详细介绍。

第三章对中高速船 KCS 进行了前体线型优化，通过对优化结果的分析，验证了船型优化求解器的可靠性。

第四章针对低速肥大船，对 JBC 进行了艏部和艉部线型优化，在艉部线型优化中分别进行了以总阻力为目标的单目标优化，以及以总阻力和伴流品质为目标的多目标优化。

第五章同时考虑片体的几何重构和片体间布局，对某错列四体船进行了线型优化。

第六章对全文进行了总结，并对目前工作内容和相关结论进行了梳理，同时对未来需要集中开展的研究工作进行了展望。



第二章 船型优化方法

2.1 船体线型优化软件 OPTShip-SJTU

船体线型优化问题为：

$$\begin{cases} \min f(x) \\ S.T. g(x) = 0, h(x) \geq 0 \\ x \in D \end{cases} \quad (2.1)$$

其中， $f(x)$ 为目标函数，一般是船舶的水动力性能，例如阻力性能、推进性能、耐波性能以及操纵性能等等； $g(x)$ 和 $h(x)$ 为约束函数，进行船体几何重构的时候应当满足一些约束条件，以避免不合实际的船型产生，例如主尺度保持不变、排水体积和湿表面积变化不大； x 是设计变量，通常是船型变换方法中的参数，设计变量和船体线型是一一对应的关系，即一组设计变量只能对应唯一的船型，反之亦然； D 为可行域，即船型设计空间，也是优化算法的搜索范围。

基于以上船体线型优化问题，课题组自主开发了船体线型优化软件 OPTShip-SJTU^[90]，该软件集成了船型变换模块^[91]，水动力性能评估模块，优化模块以及近似技术^[92]，软件框架如图 2-1 所示。

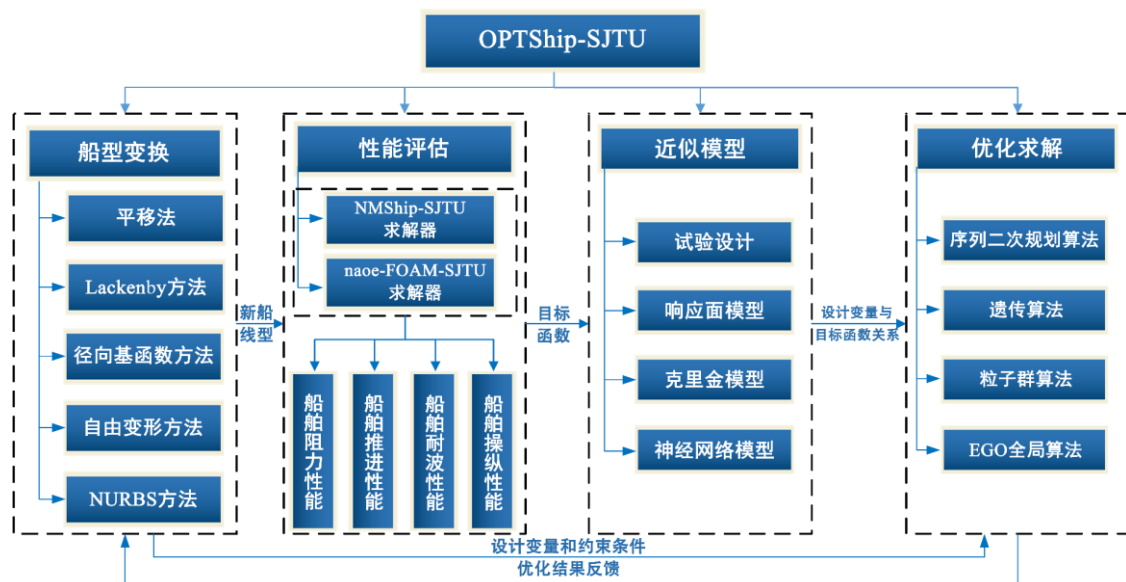


图 2-1 船体线型优化软件 OPTShip-SJTU 框架

Fig.2-1 Framework of hull form optimization software OPTShip-SJTU



2.2 船型变换方法

船型变换方法和设计变量共同决定了设计空间的大小，只有重构出丰富多样的新船型供优化算法进行搜索，才有可能取得良好的优化效果，因此船型变换方法的好坏将直接影响最后的优化结果。本节将对本文所使用的船型变换方法以及相关研究进行介绍，其他变形方法在此不作介绍，可参见文献[91]。

2.2.1 平移法

平移法（Shifting Method）是一种参数化模型方法，通过修改函数对船体横剖面面积曲线进行修改，并通过有序平移各站位型线得到重构船型。

为了使全船实现连续协调变换，引入修改函数 g ：

$$g = \begin{cases} \alpha_1 \left[0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_2}{\alpha_2 - x_1}) \right]^{0.5}, & x_1 \leq x \leq \alpha_2 \\ -\alpha_1 \left[0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_2}{\alpha_2 - x_2}) \right]^{0.5}, & \alpha_2 \leq x \leq x_2 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.2)$$

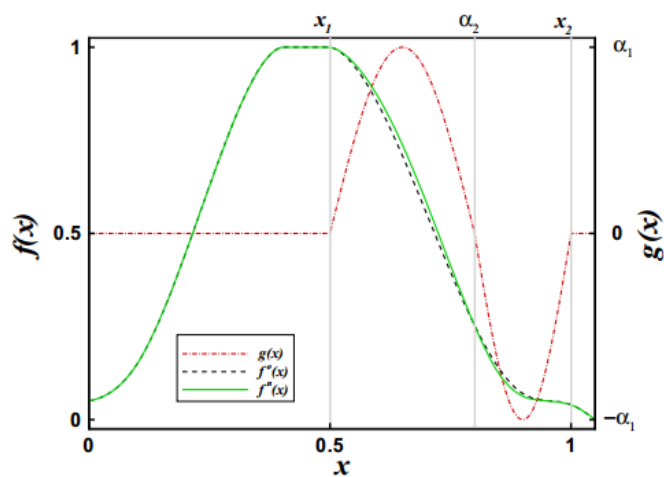


图 2-2 平移法示意图
Fig.2-2 Shifting Method

其中涉及四个变量： x_1 和 x_2 分别为修改区域的起始站位和终止站位， α_1 为修改函数的幅值， α_2 为固定不变站位（图 2-2）。只要读取原始点的 x 坐标，便可通过修改函数求得该点的平移矢量，从而实现船型重构。



平移法的设计变量较少，变形效率高，适用于全船或者半船的整体重构。如图 2-3 所示采用平移法对 KCS 前体进行整体重构，左边为艏部变胖中间变瘦，右边为艏部变瘦中间变胖，两者修改函数的修改区域和固定站位相同，修改幅值互为相反数。

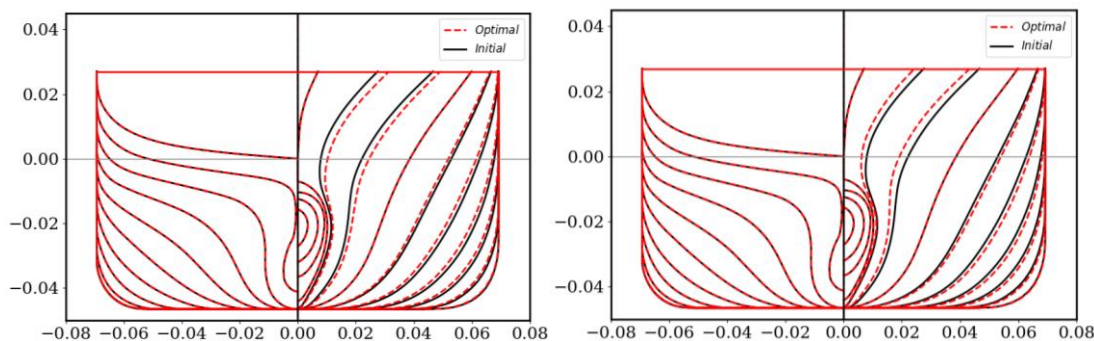


图 2-3 平移法对 KCS 前体进行整体重构
Fig.2-3 Global modification for KCS fore body by Shifting Method

2.2.2 FFD 方法

FFD (Free-Form Deformation) 方法由 Sederberg 和 Parry^[93]提出，其设计变量较少，曲面变化非常灵活，而且对变形区域的大小和位置严格可控，可用于局部变形，也可用于整体变形。

(1) 数学模型

①创建 Lattice 和局部坐标系

首先创建一个 Lattice，将待重构船体曲面包含在内，Lattice 的范围即为变形区域，以 Lattice 的一个顶点为原点建立局部坐标系 $O'-STU$ ，如图 2-4 所示：

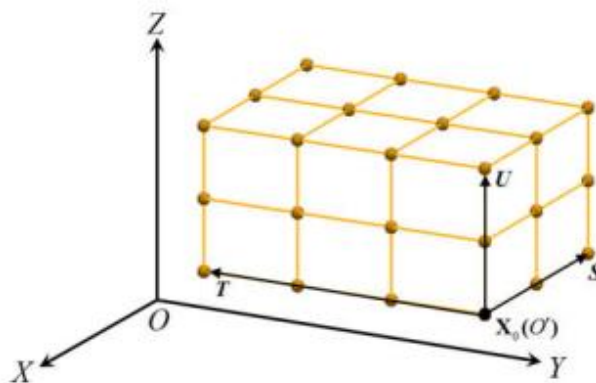


图 2-4 Lattice 和局部坐标系
Fig.2-4 Lattice & local system



图中 $\mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{U}$ 为坐标轴矢量。假设坐标系 $\mathbf{O}-\mathbf{XYZ}$ 中有一点 $\mathbf{X}$ ，它在局部坐标系中的坐标为 (s, t, u) ，则有：

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + s\mathbf{S} + t\mathbf{T} + u\mathbf{U} \quad (2.3)$$

根据坐标变换， s, t, u 可表示为：

$$s = \frac{\mathbf{T} \times \mathbf{U} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{T} \times \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}}, \quad t = \frac{\mathbf{S} \times \mathbf{U} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{S} \times \mathbf{U} \cdot \mathbf{T}}, \quad u = \frac{\mathbf{S} \times \mathbf{T} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{S} \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{U}} \quad (2.4)$$

显然，对于长方体中任意一点 $\mathbf{X}$ ，其 s, t, u 的值均在 0 和 1 之间。

②构造控制顶点

然后，在 Lattice 中构造控制顶点 $\mathbf{Q}_{i,j,k}$ ，并分别沿 $\mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{U}$ 三个方向将 Lattice 进行 l, m, n 等分，则有：

$$\mathbf{Q}_{i,j,k} = \mathbf{O}' + \frac{i}{l}\mathbf{S} + \frac{j}{m}\mathbf{T} + \frac{k}{n}\mathbf{U} \quad (2.5)$$

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

如此，框架内任意一点 $\mathbf{X}$ 可以用控制顶点表示为：

$$\mathbf{X}(s, t, u) = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,l}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) \mathbf{Q}_{i,j,k} \quad (2.6)$$

式中， $B_{i,l}(s)$ ， $B_{j,m}(t)$ 和 $B_{k,n}(u)$ 均为伯恩斯坦多项式基函数，以 $B_{i,l}(s)$ 为例定义如下：

$$B_{i,l}(s) = \frac{l!}{i!(l-i)!} s^i (1-s)^{l-i} \quad (2.7)$$

③变形

由 (2.6) 式可知，初始船体表面上点的坐标是 $l \times m \times n$ 个控制顶点的线性函数，通过移动控制顶点即可实现船型变换。假设 Lattice 内的一点 $\mathbf{X}$ 的局部坐标为 (s, t, u) ，控制顶点 $\mathbf{Q}_{i,j,k}$ 移动到 $\mathbf{Q}'_{i,j,k}$ ，则点 $\mathbf{X}$ 也将移动到点 $\mathbf{X}_{ffd}$ ：

$$\mathbf{X}_{ffd} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_{i,l}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) \mathbf{Q}'_{i,j,k} \quad (2.8)$$

根据实际情况选取不同数量的移动控制点，指定不同的移动方向以及移动量，即可实现不同的变形效果。

(2) 单一的移动控制点

如图 2-5 所示，采用 FFD 方法对 KCS 球鼻艏进行变形，选取一组沿吃水方向移动的控制点（红色）即可实现球鼻艏的上翘和下垂，其他方向同理，不再赘述。

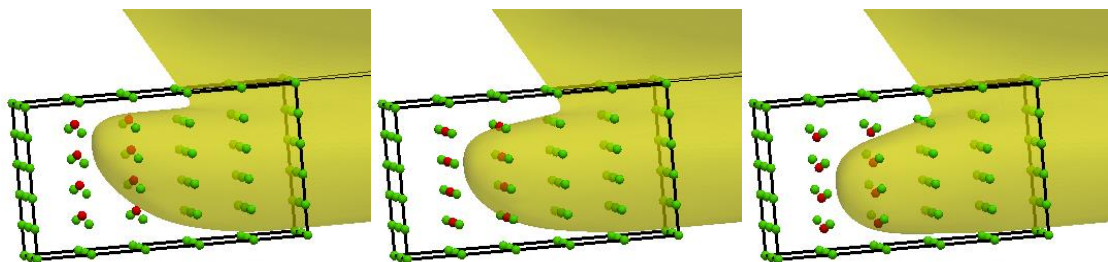


图 2-5 沿吃水方向移动的控制点实现球鼻艏的上翘和下垂（中间为原型）
Fig.2-5 Motion of red control points to make bow raise / droop (mid is original)

(3) 组合式的移动控制点实现多样化变形

如图 2-6 所示，如果采用单一的控制点对横剖面进行变形，不但线型没有较大变化（单一的变胖变瘦），反而排水量的变化很大，显然无法得到多样的新船型。

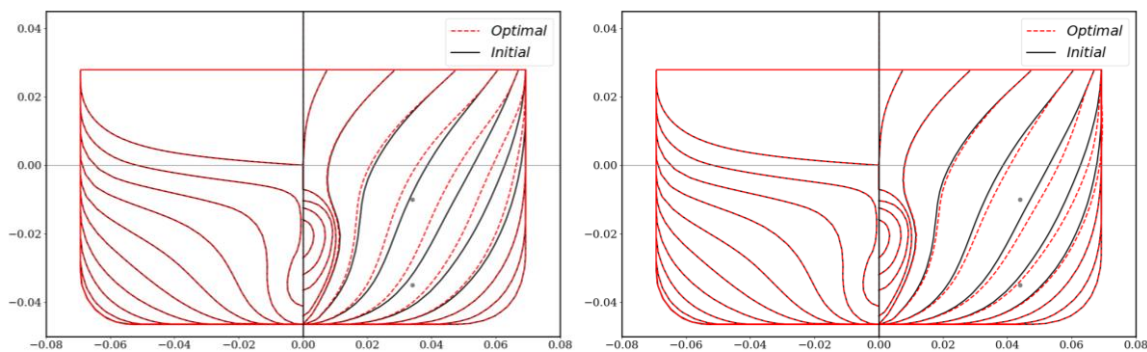


图 2-6 单一的控制点移动
Fig.2-6 Motion of single group of control points

由 (2.7) 式知，离控制点越近的坐标点受其移动的影响越大，因此可以采用组合式的移动控制点实现多样化的变形。如图 2-7 所示，采用上下两组沿船宽方向独立移动的控制点即可实现横剖面的多样化变形。

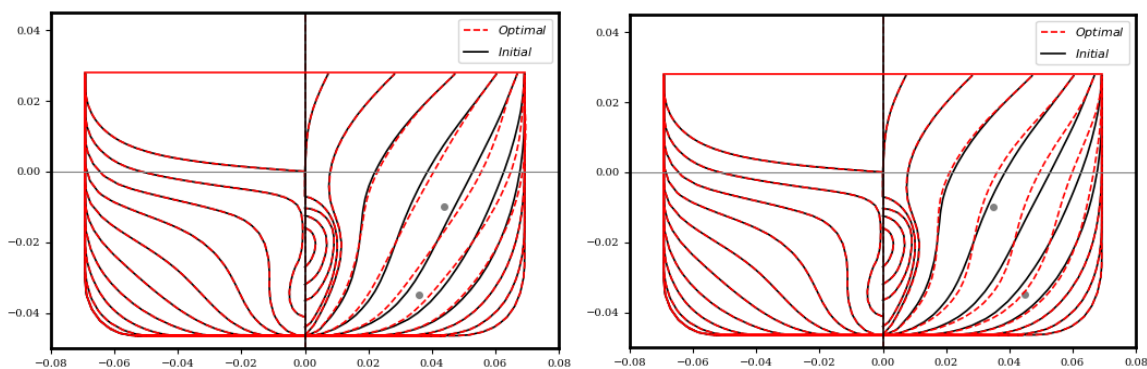


图 2-7 组合式的控制点移动
Fig.2-7 Motion of two groups of control points



2.3 水动力性能评估方法

水动力性能评估方法的精度和效率会直接影响优化结果的可靠性和整个优化进程的效率，在保证精度可靠的前提下使用高效的性能评估求解器是关键。

2.3.1 Neumann-Michell 理论

Neumann-Michell (NM) 理论是由 Francis Noblesse 等学者在 Neumann-Kelvin (NK) 理论的基础上提出的高效数值评估方法，它消去了 NK 理论中较难处理的沿船体水线的积分项，将全部的计算都转化为在船体水线面以下的积分，该理论详细内容可参考文献[95]。该方法可快速评估船舶阻力，尽管与其他高精度阻力预报方法相比并不算突出，但是其评估效率非常高，足以满足船型优化的实际需求。

本文采用了课题组自主开发的基于 NM 理论的求解器 NMSHIP-SJTU^[96]，该求解器的可靠性已得到充分的验证。通过该求解器对兴波阻力进行预报，并加上 1957-ITTC 公式计算得到的摩擦阻力作为船体总阻力，能可靠且高效地应用于中高速船的线型优化中^[97]。

2.3.2 RANS 方法

为了评估低速肥大船的阻力性能和伴流品质，本文还将采用课题组自主开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU^[98]进行船型优化。该求解器可以准确预报船舶的各种水动力性能，并且能给出精细的流场特征，其可靠性和准确性已在很多研究中^[99-101]得到验证。该方法需要求解两相不可压 RANS 方程，并采用 VOF 方法捕捉自由面。

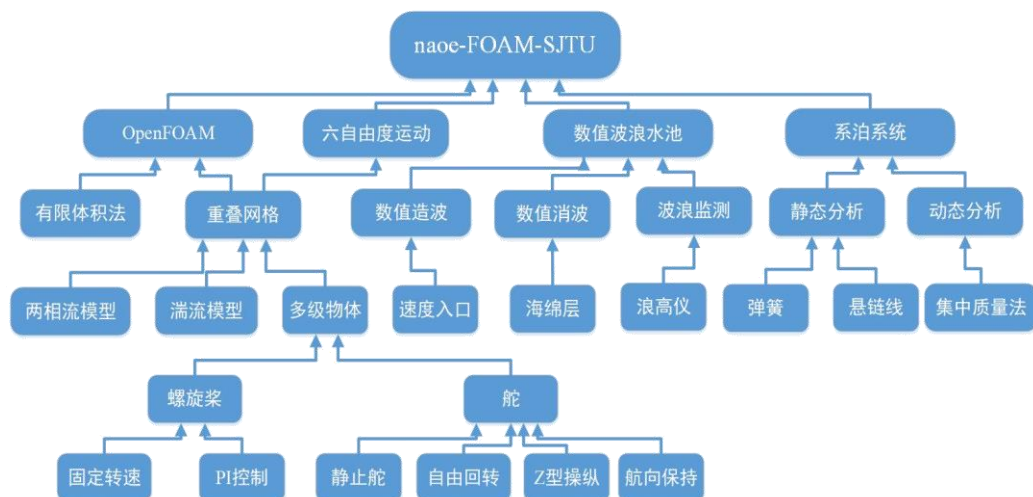


图 2-8 naoe-FOAM-SJTU 求解器
Fig.2-8 Framework of naoe-FOAM-SJTU



2.3.3 叠模方法

叠模方法是将船模的水下部分关于设计水线面对称后完全浸没于水中，叠模方法忽略了自由面的影响，不要求解自由面，相比于计及自由面的情况计算量大大降低，对于低速肥大船，尤其是在约束条件下船型变化对自由面影响不大的情况下，既能大大缩短优化周期，又能保证数值计算的精度和可靠性^[75-77]。该方法采用 pimpleDyMFoam 求解器进行求解。

2.4 优化算法

优化算法是船型优化的驱动，也是能否正确求得最优解的关键。本文采用基于随机搜索的全局优化算法，单目标遗传算法(GA)和多目标遗传算法(NSGA-II)。

2.4.1 单目标遗传算法

遗传算法是一种模拟自然界生物进化过程的随机搜索算法，该算法采用了自然选择机制和交叉变异机制，算法的大致流程（图 2-9）如下：

①在船型优化过程中，该算法将设计变量进行编码后赋予每个个体，作为不同个体携带的“基因”，因此每个个体就对应一个船型；

②所有个体将组成一个种群，种群中的每个个体都会根据其性能被赋予一定的适应度，性能越好的个体适应度越大；

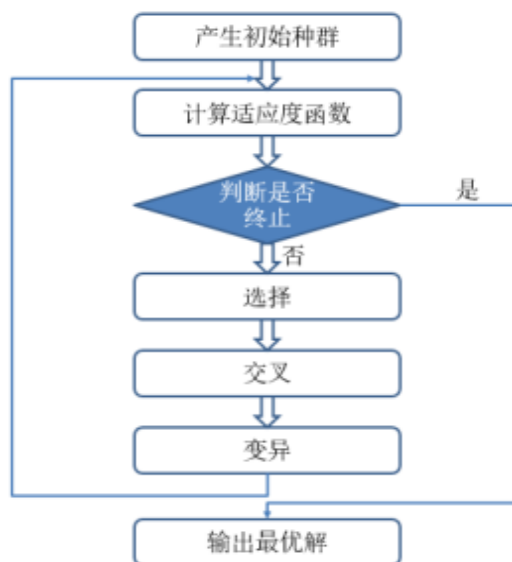


图 2-9 遗传算法基本流程
Fig.2-9 Flow chart of Genetic Algorithm



③每一代种群中的所有个体会按一定比例进行筛选，适应度越大，也就是性能越优秀的个体被选中并保留的概率就越大，而其他个体将被淘汰筛选；

④保留的父代个体将按设定的交叉率和变异率进行编码交换和编码突变，并产生相同数目的子代个体，即保持种群个体数量不变，子代种群重复②③④操作；

⑤经过若干次迭代之后，种群中的个体将收敛到最优解。

单目标遗传算法程序的可靠性已经过测试，结果表明程序能有效获取全局最优解^[92]。

2.4.2 多目标遗传算法

当只有一个目标函数时，可以找到一个全局最优解，这个解优于其他所有解。而当多个目标共存时，目标之间往往存在冲突，很难找到一个解使得所有目标同时最优。因此，多目标优化的实质是：在不让任何一个目标变差的前提下，至少使得一个目标变优，这种改善被称为 Pareto 优化。对于多目标优化问题，通常存在一个解集，特点是其中所有解都不再拥有 Pareto 优化的余地，这种解集称作 Pareto 最优解集（Pareto optimal Solutions）。

NSGA 采用非支配分层方法，可使性能更优的个体有更大的概率存活；适应度共享策略可防止“超级个体”的过度繁殖而早熟收敛。但是 NSGA 仍存在缺乏精英策略、计算复杂等问题。NSGA-II 引进了精英策略，将优良父代个体直接保存到子代种群，防止优良个体的丢失导致算法效率的下降；另外，采用拥挤度比较算子来评估个体周围的群体密度，并同时根据非支配排序和拥挤度选取合适的个体，在带精英策略的条件下保证了种群的多样性。因此，NSGA-II 成为了目前最流行、最可靠的多目标遗传算法。

NSGA-II 程序的可靠性已经过测试，结果表明程序能有效获取 Pareto 前沿^[92]。

2.5 近似技术

由于数值模拟计算需要大量的计算成本，近似技术的引入在保证一定精度的前提下，可大幅提高优化效率，缩短优化周期。

2.5.1 试验设计方法

试验设计方法是一种从数理统计学的角度确定试验设计方案的方法，在保证样本群体精度的同时，降低数值模拟的计算成本。图 2-10 展示了均匀分布试验设计、随机拉丁超立方试验设计和优化拉丁超立方试验设计。可以看出，优化拉丁



超立方试验设计的均匀性和正交性都更优秀，能合理减少近似模型的样本点数量，并提升近似模型的近似能力。因此，本文将采用优化拉丁超立方试验设计方法。

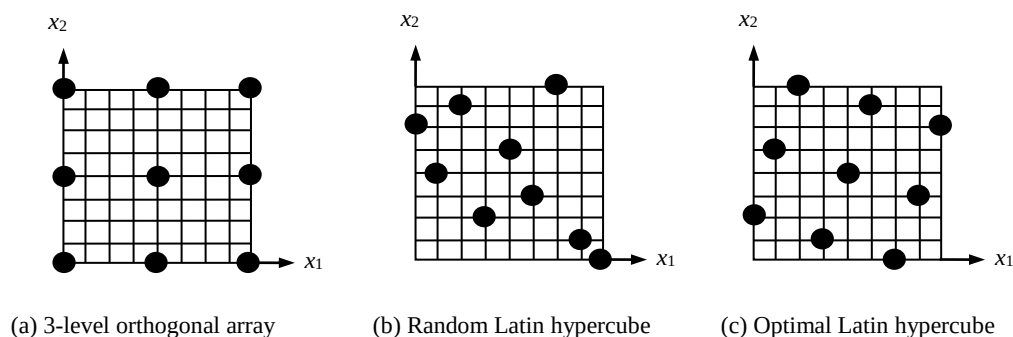


图 2-10 不同试验设计方法的均匀性和正交性
Fig.2-10 Comparison of different types of experimental design

2.5.2 Kriging 近似模型

Kriging 近似模型作为地质统计学的主要内容，最初主要应用于采矿领域，随着后来的发展逐渐被应用于各个领域。它是从变量的空间相关性出发，对变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法。其数学模型可以表示如下：

$$y(x) = f(x) + z(x) \quad (2.9)$$

式中， $y(x)$ 是待估计的未知函数， $f(x)$ 是一个已知的近似函数； $z(x)$ 是一个服从正态分布的高斯随机过程，其均值为 0，方差为 σ^2 ，协方差非零且定义如下：

$$\text{Cov}[z(x_i), z(x_j)] = \sigma^2 \mathbf{R}[R(x_i, x_j)] \quad (1 \leq i, j \leq n) \quad (2.10)$$

式中， $\mathbf{R}$ ——相关性矩阵；

$R(x_i, x_j)$ ——任意两个样本点 x_i 和 x_j 之间的相关性函数。本文采用高斯相关性函数，定义如下：

$$R(x_i, x_j) = \prod_{k=1}^{n_{dv}} \exp(-\theta_k |x_k^i - x_k^j|^2) \quad (2.11)$$

式中， n_{dv} ——设计变量个数；

$|x_k^i - x_k^j|$ ——样本点 x_i 和 x_j 的第 k 个设计变量的距离；

θ_k ——相关性系数，作为近似模型的待定系数；

相关性函数确定以后，就可以对任意观测点 x 的响应值进行估计，估计值 $\hat{y}(x)$



的表达式如下：

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(x) \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{F}\hat{\beta}) \quad (2.12)$$

式中， n_s ——样本点个数；

$\mathbf{y}$ —— n_s 维列向量，包含每个样本点的响应值；

$\mathbf{F}$ —— n_s 维列向量，当 $f(x)$ 是一个常数时退化为单位列向量；

$\mathbf{r}(x)$ —— n_s 维列向量，表示观测点 x 和所有样本点 $(x^1, x^2, \dots, x^{n_s})$ 之间的相关性，其表达式如下：

$$\mathbf{r}^T(x) = [R(x, x_1), R(x, x_2), \dots, R(x, x_{n_s})]^T \quad (2.13)$$

$f(x)$ 假定为一个常数，其估计值 $\hat{\beta}$ 表达式为：

$$\hat{\beta} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F}) \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \quad (2.14)$$

近似模型的全局部分 $\hat{\beta}$ 和样本点的响应 $\mathbf{y}$ 之间的方差估计 $\hat{\sigma}^2$ 可以表示为：

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{F}\hat{\beta})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{F}\hat{\beta})}{n_s} \quad (2.15)$$

近似模型的待定系数 θ_k 的最大似然估计为：

$$\max_{\theta_k > 0} \Phi(\theta_k) = -\frac{n_s \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|\mathbf{R}|}{2} \quad (2.16)$$

上式中 $\hat{\sigma}^2$ 和 $|\mathbf{R}|$ 都只是 θ_k 的函数，任意一组 θ_k 都对应一个唯一的近似模型，通过求解 (2.16) 式即可构建最优拟合的 Kriging 近似模型。

为了确保程序的可靠性，本文对不同的函数进行了测试，例如二维非线性函数 $y = (30 + x_1 \sin x_1)(4 + e^{-x_2^2})$ (图 2-11)，结果表明 Kriging 模型具有良好的近似能力。

2.6 本章小结

本章对课题组自主开发的船型优化软件 OPTShip-SJTU 的框架和模块进行了简要介绍，并对本文所使用的一些方法进行了详细介绍，为后续工作做好铺垫。

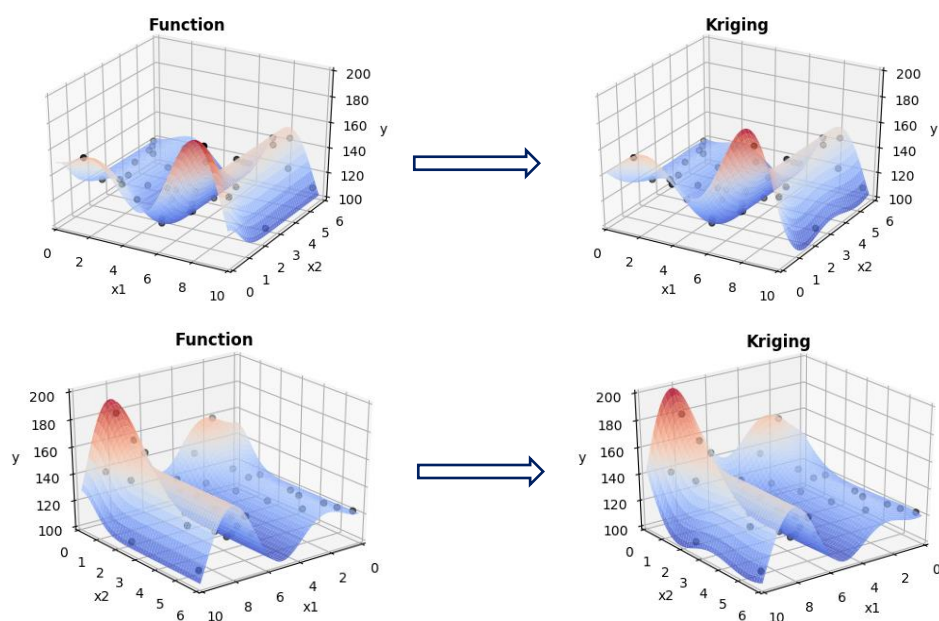


图 2-11 原始函数和 Kriging 近似模型
Fig.2-11 Original function and Kriging model



第三章 中高速船线型优化

3.1 引言

对于中高速船来说，摩擦阻力和兴波阻力占主要成分，但在约束条件下，船体湿表面积的变化被限定在很小的范围之内，因此摩擦阻力很难降低；而兴波阻力受艏部形状的影响很大，尤其是球鼻艏，能和船体产生有利的兴波干扰，从而大幅削减兴波阻力，总阻力也能得到有效降低。

由于这些原因，中高速船一直都是主要的研究对象，为了验证船型优化求解器的可靠性，本章将对中高速船 KCS 标模进行前体线型优化。

3.2 优化对象描述

KCS 是韩国船舶与海洋工程研究所(KRISO)设计的一艘 3600TEU 集装箱船，目前已被作为标模，船模主要船型参数见表 3-1，模型示意图见图 3-1。



图 3-1 KCS 船模示意图
Fig.3-1 KCS model

表 3-1 KCS 船模主尺度要素表
Table 3-1 Hull data of KCS

项目	符号	单位	实船	模型
垂线间长	L_{PP}	m	230	7.2786
水线长	L_{WL}	m	232.5	7.3577
型宽	B	m	32.2	1.0190
吃水	T	m	10.8	0.3418
方形系数	C_B	—	0.6505	0.6505
排水体积	∇	m^3	52030	1.6490
湿表面积	S_w	m^2	9424	9.4379



3.3 性能评估的可靠性验证

在进行 KCS 线型优化之前，首先采用 2.2 节介绍的基于 NM 理论的高效水动力性能求解器 NMShip-SJTU 对 KCS 的阻力进行评估，总阻力采用 NMShip-SJTU 求解的兴波阻力与 1957-ITTC 经验公式计算得到的摩擦阻力求和的方式计算，然后与模型试验结果进行对比，以保证 KCS 性能评估的可靠性。

3.3.1 计算区域及网格划分

NMShip-SJTU 求解器需要对水下部分船体表面布置网格进行离散，KCS 船模表面采用大约 12200 个三角形单元进行离散，网格布置如图 3-3 所示，其中针对模型首尾部网格进行适当加密。自由面计算域大小为 $-L_{pp} < X < 4 L_{pp}$, $0 < Y < 1.5 L_{pp}$ (船体部分范围为 $0 < X < L_{pp}$)，采用半域计算，船体附近一定范围内进行适当加密，网格划分如图 3-2 所示。

在优化过程中，船体形状发生了变化，但其网格拓扑结构保持不变，在一定约束条件下网格尺度也基本不变，如此可保证重构船型的性能评估采用统一的“标尺”，从而减少由于网格差异带来的数值计算“噪声”。

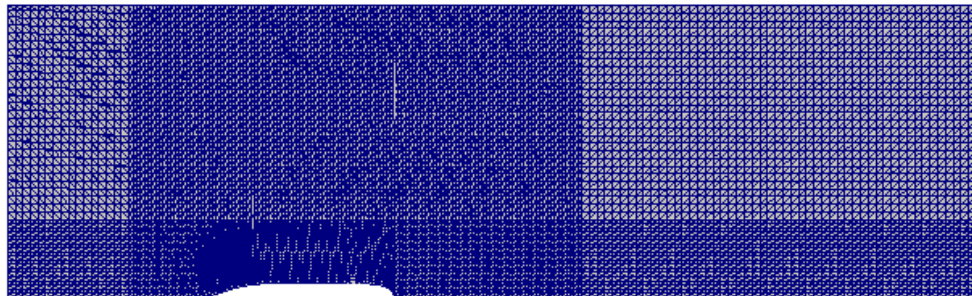


图 3-2 自由面计算域网格划分
Fig.3-2 Free surface grid

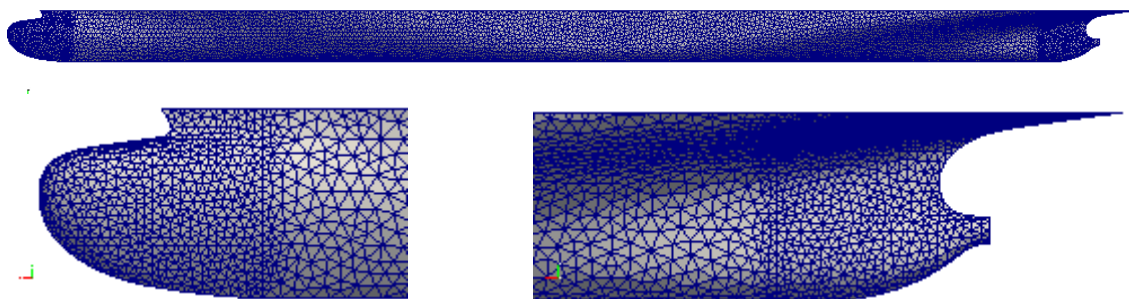


图 3-3 水下部分船体表面网格布置
Fig.3-3 Underwater hull surface grid



3.3.2 数值计算结果的模型试验验证

对 KCS 在不同航速下的总阻力进行预报，并与试验结果进行对比，总阻力系数 C_t 按如下公式计算：

$$C_t = \frac{R_t}{0.5\rho V^2 S} \quad (3.1)$$

其中 R_t 为总阻力， ρ 为水的密度取 999.5 kg/m^3 ， V 为船模速度， S 为船模在静水中的湿表面积，另外水的粘度 ν 取 $1.27\text{e-}6 \text{ m}^2/\text{s}$ ，重力加速度 g 取 9.81 m/s^2 ，均与试验值保持一致。

KCS 总阻力数值计算结果与试验结果对比如表 3-2，图 3-4 所示。从图表中可以看出，数值计算的模型总阻力与模型试验结果总体上吻合良好，设计航速 $Fr = 0.26$ 下偏差仅 1.316%，尽管与其他高精度阻力预报方法相比并不算突出，但是其评估效率非常高，足以满足船型优化的实际需求。由于采用 ITTC 经验公式对粘性阻力部分进行粗估，存在一定程度的偏差，但是在优化过程中，湿表面积的变化被约束在很小的范围内，摩擦阻力基本保持不变，而且中高速船的粘压阻力占比极低，实践表明对于兴波阻力占比较大的中高速船来说，这种近似处理是合理的（严谨起见，本文将对优化方案的阻力成分及其变化进行计算分析以验证数值方法的可靠性）。

图 3-5 是 KCS 船侧波高（ $Fr = 0.26$ ）数值计算结果与模型试验结果的比较。从图中可以看出，数值计算结果整体上与试验值吻合良好，只有船首船尾处略有偏差。图 3-6 为 KCS 船模波形图。

表 3-2 KCS 船模总阻力数值计算结果与试验结果比较
Table 3-2 Comparison of total resistance between NM+ITTC and Exp.

Fr	V (m/s)	Re (10^6)	$C_t(10^{-3})$		$R_t(\text{N})$		阻力误差 (%)
			NM+ITTC	Exp.	NM+ITTC	Exp.	
0.108	0.915	5.23	3.815	3.796	15.066	14.990	0.509
0.152	1.281	7.33	3.704	3.641	28.670	28.180	1.739
0.195	1.647	9.42	3.693	3.475	47.251	44.460	6.277
0.227	1.922	11.0	3.732	3.467	65.030	60.407	7.653
0.260	2.196	12.6	3.760	3.711	85.519	84.408	1.316
0.282	2.379	13.6	4.766	4.501	127.228	120.101	5.890

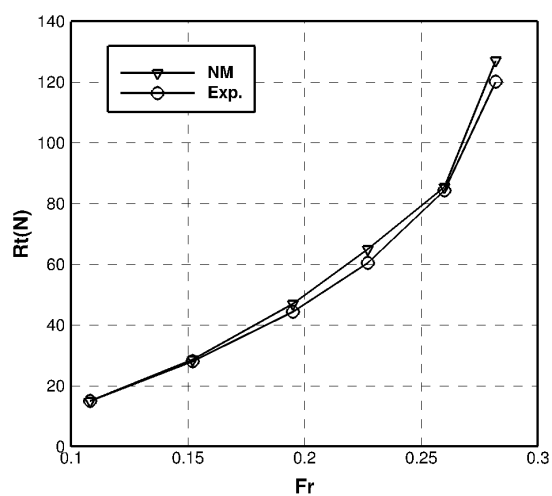


图 3-4 KCS 船模总阻力数值计算结果与试验结果比较
Fig.3-4 Comparison of total resistance between NM+ITTC and Exp.

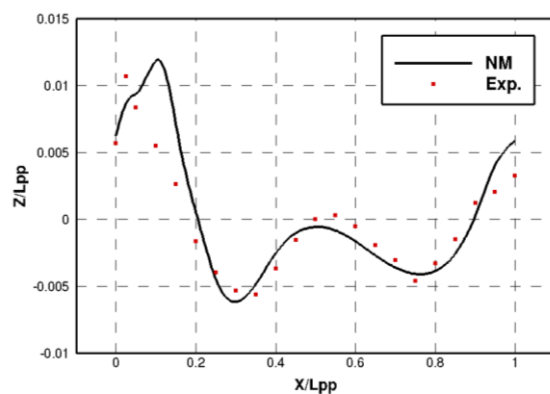


图 3-5 KCS 船侧波高数值计算结果与试验结果比较 (Fr = 0.26)
Fig.3-5 Comparison of wave height along hull between NM and Exp. (Fr = 0.26)

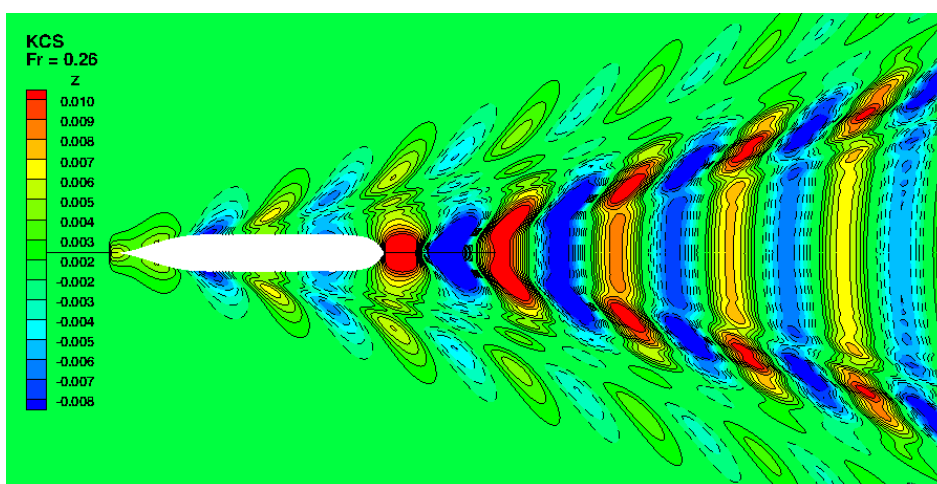


图 3-6 KCS 波形图 (Fr = 0.26)
Fig.3-6 Wave pattern of KCS (Fr = 0.26)



从以上数值计算结果与试验结果的比较表明，NM 数值方法具有一定的精度，足以满足船型优化的实际需求。该方法进行一次阻力评估仅需数分钟，能对优化过程中的重构船型的阻力性能进行快速预报。因此，在本次优化过程中采用该数值方法进行阻力评估是可靠且高效的。

3.4 KCS 前体线型优化

选择 KCS 前体作为线型优化的区域，如图 3-7 所示。

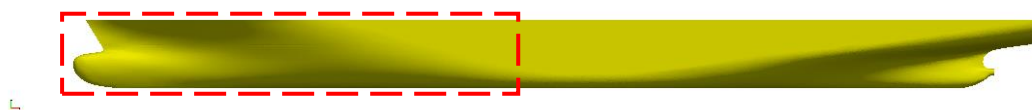


图 3-7 KCS 前体线型优化区域
Fig.3-7 Hull modification area

3.4.1 优化问题的定义

(1) 目标函数

由于船体几何重构会使湿表面积发生变化，因此考虑以设计航速下（ $Fr = 0.26$ ）的总阻力最小而非总阻力系数最小作为优化目标。另外，在优化过程中，对总阻力进行归一化处理。目标函数如下：

$$F = R_t / R_{t0} \quad (3.2)$$

式中， R_t 为重构船型的总阻力， R_{t0} 为原型总阻力。

(2) 几何重构方法及设计变量选取

KCS 前体几何重构采用整体重构和局部重构结合的方法，整体重构采用平移法，局部重构采用 FFD 方法。平移法使用一个形状修改函数对 KCS 横剖面面积曲线进行修改，其中参数 $x_{1f} = -0.06$ ， $x_{2f} = 0.5$ （修改范围为 $-0.06 \sim 0.5$ ）， α_{1f} （形状修改函数幅值）、 α_{2f} （不动点）作为两个设计变量。FFD 方法采用 3 个 Lattice 对不同区域进行几何重构。

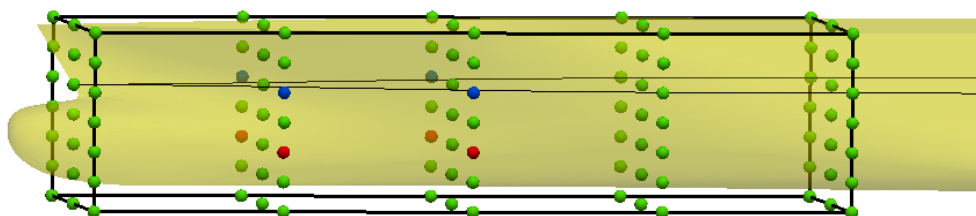
Lattice1 采用组合式的控制点，选取两组沿船宽方向移动的控制点来控制横剖面的形状，Lattice1 的范围大小及控制点分布如图 3-8 a) 所示，图中红色移动控制点控制水线附近的形状变化，蓝色移动控制点控制舭部附近的形状变化，部分较典型的变形效果如图 3-8 b)、3-8 c) 所示。从图 3-8 b) 中可以看到水线附近型线向外扩张，而舭部附近型线内缩，横剖面形状往“V 型”变化；而图 3-8 c) 中水线附近型线内缩，而舭部附近型线向外扩张，横剖面形状往“U 型”变化。当然，



其组合的多样性决定了型线变化具有丰富的多样性。可以看出，这两组移动控制点组合在一起能有效改变横剖面的形状，将这两组控制点沿船宽方向的移动量作为两个设计变量，分别为 Y1（舳部）和 Y2（水线）。

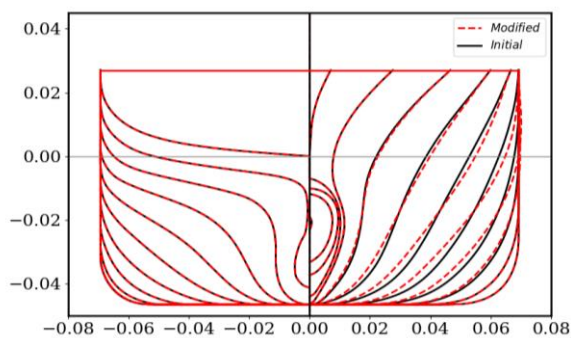
Lattice2 和 Lattice3 用来控制球鼻艏的形状。如图 3-9 a) 所示，Lattice2 选取两组沿船长方向移动的控制点来控制球鼻艏的突出长度（蓝色点控制）和凹陷程度（红色点控制），将其移动量分别作为设计变量 X1、X2；同时选取一组沿吃水方向移动的控制点来控制球鼻艏的高度，如图 3-9 b) 所示，将其移动量作为设计变量 Z1。Lattice3 选取一组沿船宽方向移动的控制点来控制球鼻艏的宽度，如图 3-9 c) 所示，将其移动量作为设计变量 Y3。从图中可以看出，所选取的控制点可以很好地控制球鼻艏沿各个方向上的形状变化。

本次优化共选取 8 个设计变量，各个设计变量的取值范围见表 3-3。



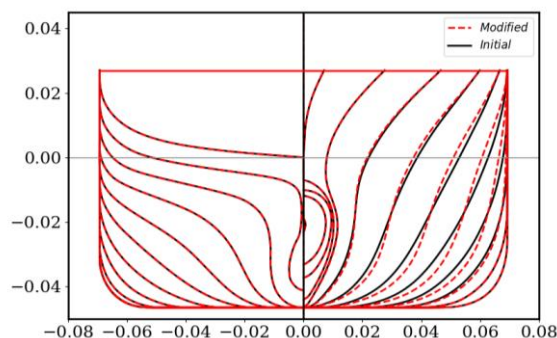
a) Lattice1 范围大小及控制点分布

a) Lattice1 and control points



b) 横剖面往“V 型”变化

b) Transformation into “V” section



c) 横剖面往“U 型”变化

c) Transformation into “U” section

图 3-8 Lattice1 控制横剖面形状
Fig.3-8 Lattice1 modify section shape

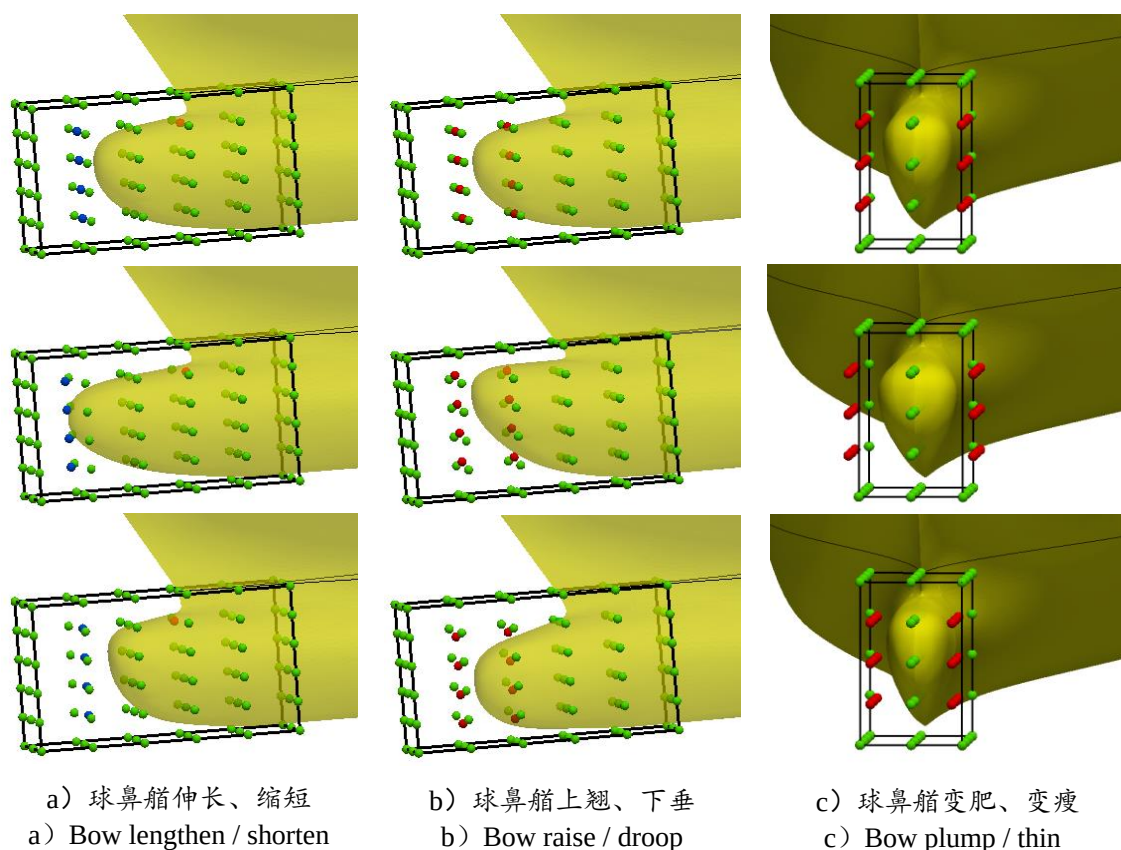


图 3-9 Lattice2 和 Lattice3 控制球鼻艏形状 (上方为原型, 中下为变型)
Fig.3-9 Lattice2 & Lattice3 modify bow shape (Up original, Mid & Down modified)

(3) 约束条件

在几何重构的过程中, 需满足一定的约束条件, 防止不合实际的船型产生。本次 KCS 前体线型优化保证主尺度 L_{pp} 、 B 、 T 固定不变, 且排水量变化不超过 $\pm 1\%$, 湿表面积变化不超过 $\pm 0.5\%$ 。

(4) 优化策略

为解决数值计算带来的响应时长和计算成本等问题, 采用近似技术来代替数值计算完成优化过程中对重构船型的阻力评估。本次优化通过优化拉丁方试验设计方法在设计变量范围内均匀选取 80 个样本点 (样本点设计变量值进行归一化处理, 部分设计变量之间的均匀性正交性分布见图 3-10), 并对重构出的 80 个样本船型的总阻力进行数值计算, 以样本船型和总阻力值构建 Kriging 近似模型, 最终采用单目标全局优化算法遗传算法 (GA) 求解最优船型, 遗传算法参数见表 3-3。

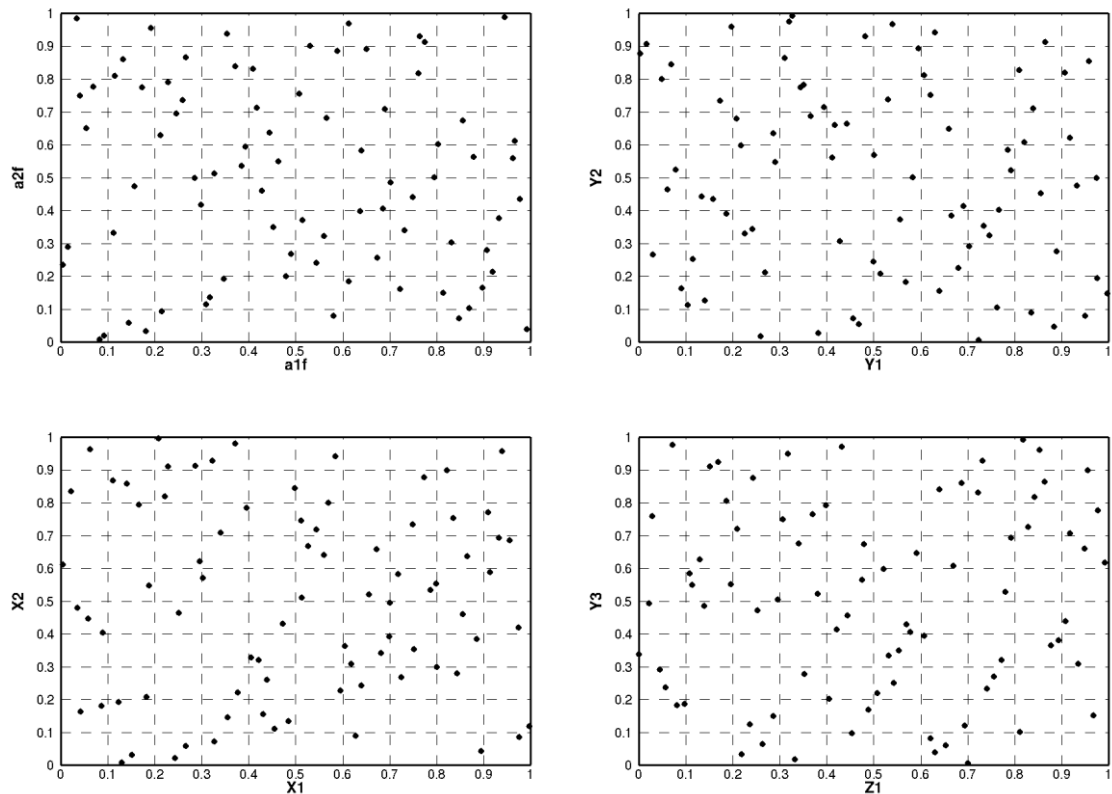


图 3-10 OLHD 试验设计部分设计变量之间的均匀性正交性分布
Fig.3-10 OLHD experimental design

表 3-3 KCS 前体线型优化问题的定义
Table 3-3 Definition of the optimization problem

项目	定义	备注
目标函数	$F = R_t / R_{t0}$	$Fr = 0.26$
设计变量		
α_{1f}	$[-0.01, 0.01]$	平移法幅值
α_{2f}	$[0.3, 0.4]$	平移法不动点
Y1	$[-0.05, 0.05]$	艤部 y 向移动量
Y2	$[-0.02, 0.02]$	水线 y 向移动量
X1	$[-0.05, 0.1]$	球艏突出 x 向移动量
X2	$[-0.05, 0.05]$	球艏凹陷 x 向移动量
Z1	$[-0.05, 0.05]$	球艏 z 向移动量
Y3	$[-0.004, 0.004]$	球艏 y 向移动量



表 3-3 KCS 前体线型优化问题的定义（续表）
Table 3-3 Definition of the optimization problem (continued)

项目	定义	备注
约束条件		
主尺度	固定不变	Lpp, B, T
∇	变化不超过 $\pm 1\%$	排水体积
S_{wet}	变化不超过 $\pm 0.5\%$	湿表面积
优化策略		
试验设计	OLHS	样本数 80
近似模型	Kriging	
优化算法	GA	
种群大小	50	
交叉率	0.8	
变异率	0.2	
最大迭代次数	150	

3.4.2 优化结果及分析

（1）优化结果

数值计算在一个 PC 上运行完成，整个优化共用时 14 个小时。在迭代到第 120 次时，各个设计变量已经基本上收敛，目标函数已达到了最小值。目标函数及其各个设计变量的在优化过程中的收敛过程如图 3-11，3-12 所示，最优方案所对应的目标函数、设计变量收敛值见表 3-4。

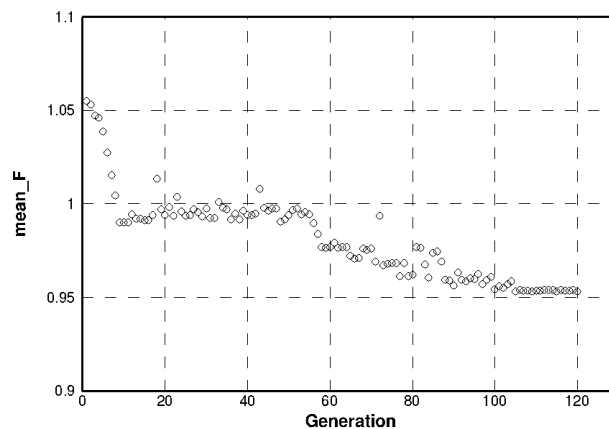


图 3-11 目标函数收敛过程
Fig.3-11 Convergence of objective function

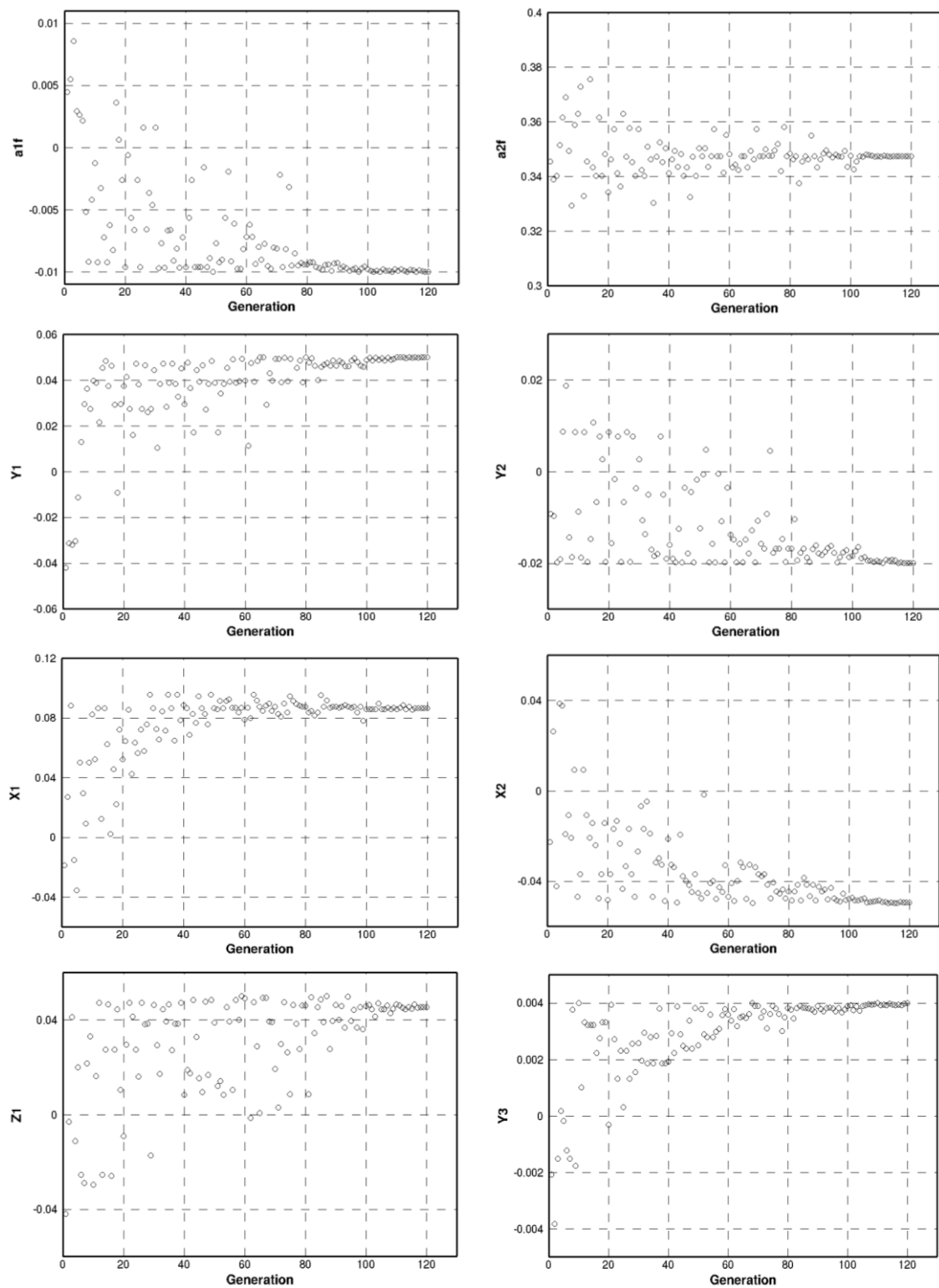
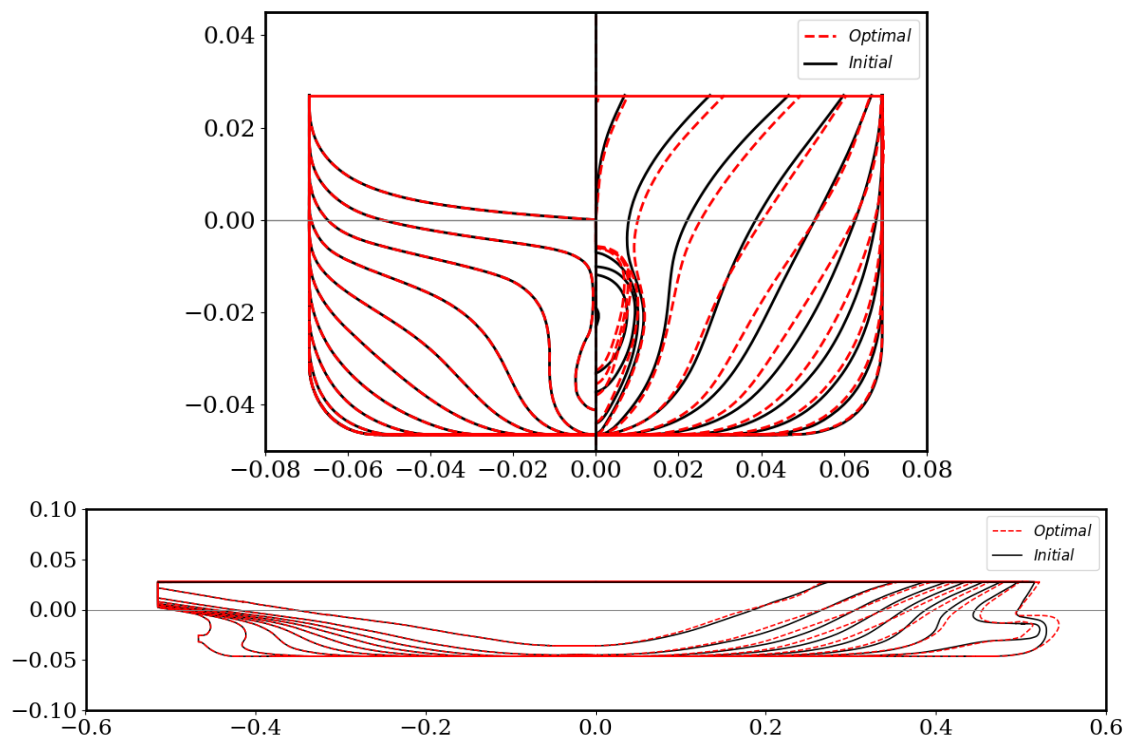


图 3-12 设计变量收敛过程
Fig.3-12 Convergence of design variables

表 3-4 最优方案
Table 3-4 Optimal solution

α_{1f}	α_{2f}	Y1	Y2	X1	Z1	Y3	F	∇	S_{wet}
-0.01	0.3475	0.05	-0.02	0.0867	0.0455	0.004	0.953	-0.692%	0.233%

图 3-13 优化方案与原始方案型线对比
Fig.3-13 Comparison of hull form lines between original and optimal design

优化结果表明，最优方案总阻力减小 4.7%，排水体积减小 0.69%，湿表面积增加 0.23%，优化效果明显，且排水体积和湿表面积变化均在约束范围内。最优方案与原始方案型线对比如图 3-13 所示，从横剖线和纵剖线图中可以看出，优化方案在水线附近艏部型线向外扩张，肩部型线内缩，使得肩部形状变化趋于平缓，有利于减小肩波；艏部附近型线内缩，艏部半径减小，横剖面趋于“V”型；球鼻艏突出长度变大，且凹陷略甚，有上翘的趋势，同时宽度变小，使得水下部分进流段增长，入流口更尖瘦，最重要的是球艏形状的变化可对船体兴波产生有利干扰，从而减小兴波阻力。

(2) 优化方案 NM 自证及分析

采用 NM 数值方法对优化方案进行评估，阻力结果见表 3-5，其中兴波阻力



减小 19.281%，总阻力减小 4.4961%，排水量减小 0.6974%，湿表面积增加 0.2532%，与以近似模型为基础求解的最优目标函数值一致，说明在优化过程中采用近似模型代替数值方法进行性能评估是可靠的。

图 3-14、3-15、3-16 分别给出了原始方案和优化方案的波形对比、船体表面压力对比和船侧波高对比，从图中可以看出优化方案船体周围兴波明显减小，船首波相位前移，沿船长方向各位置波高均降低，肩部低压区明显减小。

表 3-5 优化方案 NM 自证
Table 3-5 NM certification of optimal design

	原始方案	优化方案	变化百分比
Fr	0.26	0.26	—
$R_w(N)$	19.942	16.097	-19.281%
$R_t(N)$	85.519	81.674	-4.4961%
$\nabla(m^3)$	1.6490	1.6375	-0.6974%
$S_{wet}(m^2)$	9.4379	9.4618	0.2532%

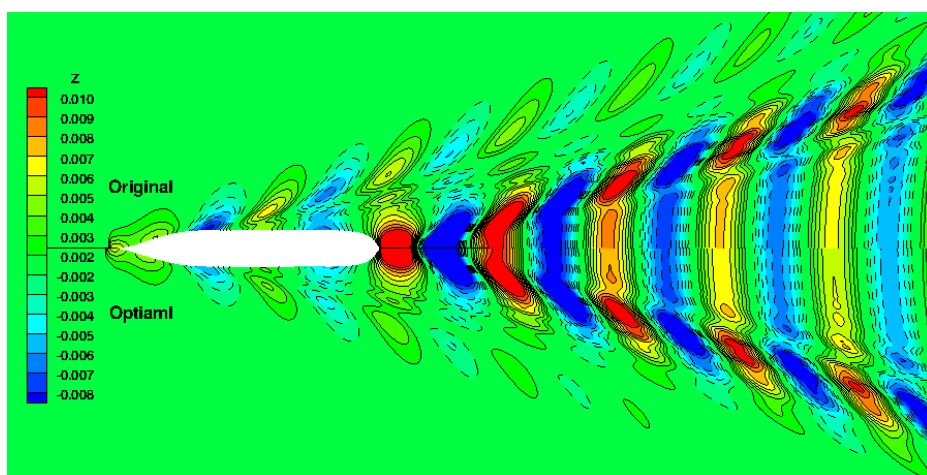


图 3-14 优化方案与原始方案波形对比
Fig.3-14 Comparison of wave pattern between original and optimal design

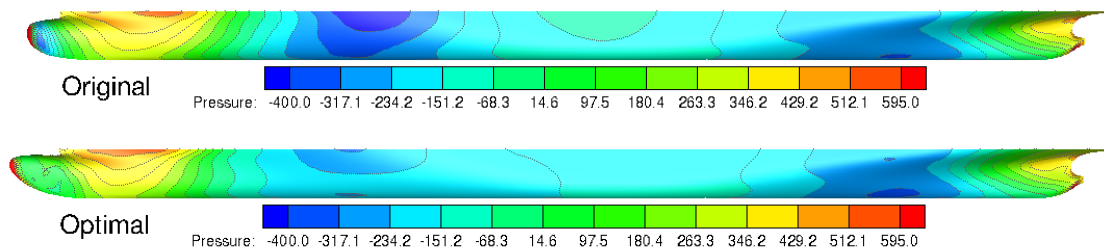


图 3-15 优化方案与原始方案压力对比
Fig.3-15 Comparison of pressure between original and optimal design

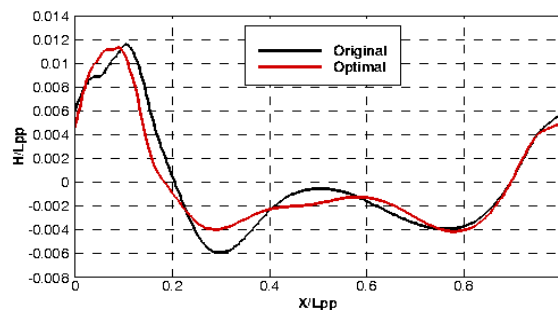


图 3-16 优化方案与原始方案船侧波高对比
Fig.3-16 Comparison of wave height along hull between original and optimal design

(3) 优化方案 RANS 验证及分析

采用 RANS 数值方法对优化方案进行评估, 阻力结果见表 3-6, 其中压阻力减小 16.421%, 总阻力减小 4.033%, 摩擦阻力的略微增加是因为湿表面积的变化引起的。表 3-7 中给出了 RANS 计算总阻力与 NM+ITTC 计算总阻力的差值变化, 可以看到差值变化极小, 仅占总阻力的 0.44%, 也就是说在排水量和湿表面积等约束条件下, 粘性阻力成分并没有发生太大变化, 总阻力最主要的变化来源于兴波阻力成分, 因此采用 NM 数值方法进行阻力评估是可靠的。

表 3-6 优化方案 RANS 验证
Table 3-6 RANS verification of optimal design

	原始方案	优化方案	变化百分比
Fr	0.26	0.26	—
$R_p(N)$	22.35	18.68	-16.421%
$R_f(N)$	63.69	63.89	0.314%
$R_t(N)$	86.04	82.57	-4.033%
$\nabla(m^3)$	1.6490	1.6375	-0.6974%
$S_{wet}(m^2)$	9.4379	9.4618	0.2532%

表 3-7 NM 和 RANS 总阻力差值的变化
Table 3-7 Variation of R_t of RANS minus R_t of NM

	NM+ITTC	RANS	RANS-(NM+ITTC)	差值变化量占比
原始方案总阻力(N)	85.52	86.04	0.52	—
优化方案总阻力(N)	81.67	82.57	0.90	0.44%



RANS 数值方法计算的波形及船侧波高图与试验结果对比见图 3-17, 3-18。图 3-19, 3-20, 3-21, 3-22 分别给出了原始方案和优化方案的波形对比、船体表面压力对比、船侧波高对比和波切对比, 整体变化趋势和 NM 数值方法结果一致, 只是 naoe-FOAM-SJTU 求解器能更精细地求解自由面, 因此波形上会略有不同, 但是兴波整体下降趋势是一致的, 这并不影响优化结果的正确求解。

根据 RANS 方法给出的精细流场进行分析: 结合船侧波高对比和波形对比可以看出, 优化方案船首波相位前移, 并在后方与横波分离; 结合波切对比和波形对比可以看出, 在 $X / L_{pp} = 0.2 \sim 0.8$ 的两个波谷之间, 原始方案仅有一次波面升高, 而优化方案却出现了两次波面升高, 说明存在“峰谷”交错叠加的现象, 从而产生了有利的兴波干扰, 使得船体兴波降低, 船体表面高压区低压区均减小。

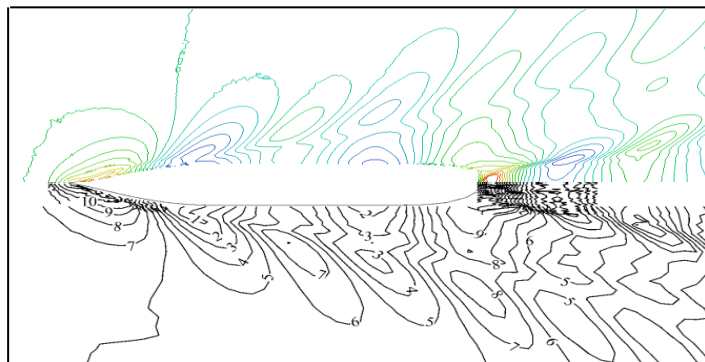


图 3-17 RANS 计算波形与试验结果对比
Fig.3-17 Comparison of wave pattern between RANS and Exp.

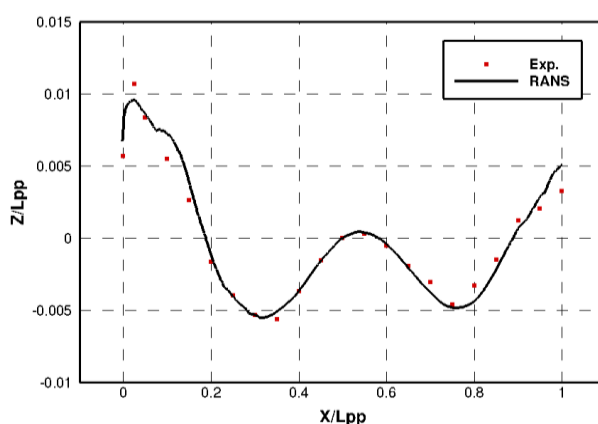


图 3-18 RANS 计算船侧波高与试验结果对比
Fig.3-18 Comparison of wave height along hull between RANS and Exp.

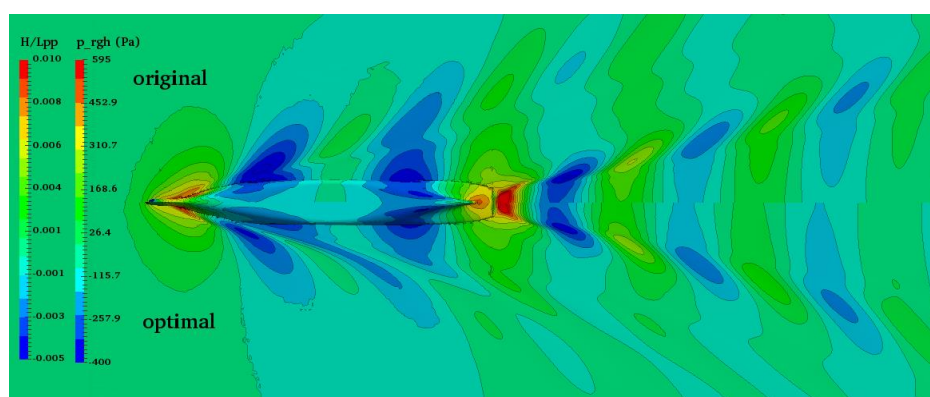


图 3-19 优化方案与原始方案波形对比
Fig.3-19 Comparison of wave pattern between original and optimal design

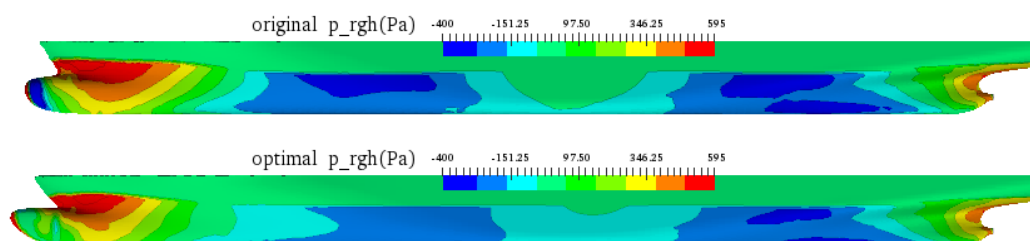


图 3-20 优化方案与原始方案压力分布对比
Fig.3-20 Comparison of pressure between original and optimal design

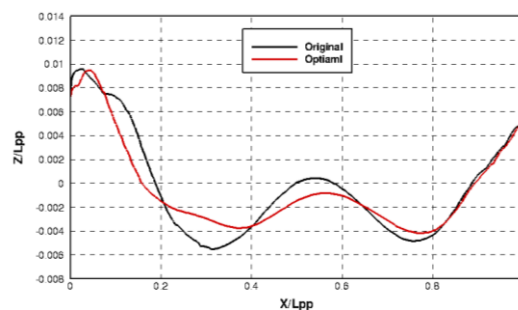
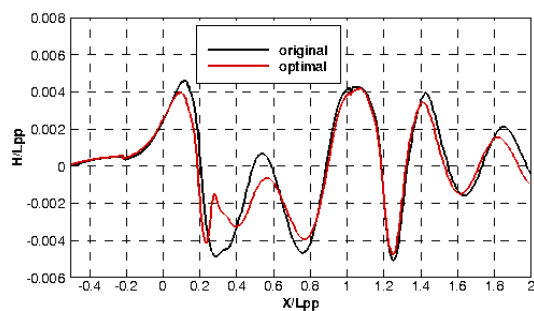


图 3-21 优化方案与原始方案船侧波高对比
Fig.3-21 Comparison of wave height along hull between original and optimal design



a) 波切比较 ($Y / L_{pp} = 0.0823$)
a) Comparison of wave cut ($Y / L_{pp} = 0.0823$)

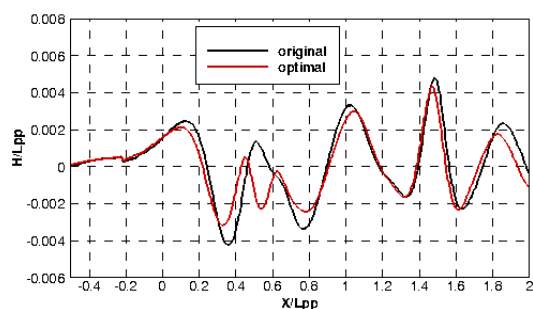
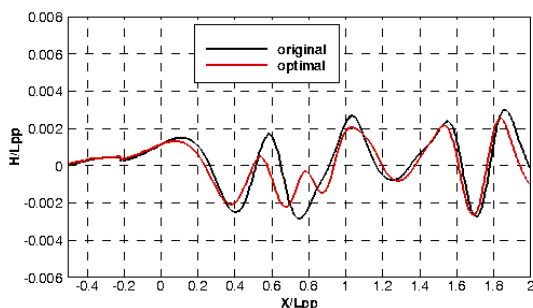
b) 波切比较 ($Y / L_{pp} = 0.1509$)b) Comparison of wave cut ($Y / L_{pp} = 0.1509$)c) 波切比较 ($Y / L_{pp} = 0.2196$)c) Comparison of wave cut ($Y / L_{pp} = 0.2196$)

图 3-22 优化方案与原始方案波切对比

Fig.3-22 Comparison of wave cut between original and optimal design

3.5 本章小结

本章以中高速船 KCS 为优化对象, 采用平移法和 FFD 方法分别对 KCS 前体进行整体和局部几何重构, 以设计航速 ($Fr = 0.26$) 下的阻力为目标, 采用 NM 数值方法评估阻力, 并构建 Kriging 近似模型来代替数值方法对优化过程中的重构船型进行阻力评估, 通过全局优化算法遗传算法求得最优船型, 经过一系列验证和分析得出以下结论:

(1) 从优化方案的数值计算结果来看, 总阻力降幅明显, 其中兴波阻力至少减少 16%, 总阻力至少减少 4%, 而摩擦阻力变化不大; 从流场对比来看, 优化方案存在“峰谷”交错叠加的现象, 从而产生了有利的兴波干扰, 使得船体兴波降低, 船体表面高压区低压区均减小。中高速船艏部形状对兴波阻力的影响很大, 通过艏部线型优化, 能取得明显的减阻效果。

(2) 采用 NM 数值方法对优化方案进行评估, 得到的总阻力降幅与基于 Kriging 近似模型的遗传算法收敛的目标函数值几乎相等, 验证了 Kriging 近似模型的可靠性, 说明采用近似技术来降低优化过程中数值计算的响应时长和计算成



本是可行的。

(3) 采用 RANS 数值方法对原型和优化船型的总阻力进行评估，计算得到的总阻力与 NM 数值方法计算得到的总阻力的差值基本不变，说明在排水量和湿表面积等约束条件下，粘性阻力成分基本不变，总阻力的减小几乎全部来自于兴波阻力成分，验证了 NM 数值方法用于中高速船阻力性能优化的可靠性。

(4) RANS 数值方法计算的原始方案和优化方案的波形对比、船侧波高对比和船体表面压力对比，整体上和 NM 数值方法结果一致，只是 naoe-FOAM-SJTU 求解器能更精细地求解自由面，因此波形上会略有不同，但是兴波整体下降趋势是一致的，这并不影响优化结果的正确求解。

(5) NM 数值方法在一台 PC 上完成一次阻力评估仅需数十分钟，而 RANS 数值方法虽可并行计算，但完成一次阻力评估仍需十多个小时，因此 NM 数值方法对于中高速船线型优化是具有优势的。



16004312



第四章 低速肥大船线型优化

4.1 引言

低速肥大船一般都有比较长的平行中体，在满足约束条件，即主尺度、排水量等基本船型参数不变的情况下，其湿表面积也不会有很大变化，因此摩擦阻力基本保持不变。与中高速船不同的是，低速肥大船的摩擦阻力在总阻力中占主要成分，兴波阻力占比很小，因此通过减小兴波阻力的方式对低速肥大船来说预期收效不大。但是相比于中高速船，低速肥大船的粘压阻力占比更高，降低粘压阻力可能是更合理的减阻思路。

粘压阻力的主要成因是水流流经船体时，由于粘性和纵向压力梯度导致流动分离，在艏部形成涡流，从而使船首尾产生压力差形成阻力。首先，粘压阻力产生的根本原因是粘性，NM 数值方法无法识别粘压阻力的变化，因此只能通过粘流方法评估阻力，这无疑会增加计算时长并延长优化周期；其次，低速肥大船方形系数较大，平行中体较长，几何重构难度更大，因此低速肥大船的线型优化是船型优化的难点。

另外，影响低速肥大船快速性的不仅仅是阻力，推进性能对快速性的影响也非常大，尤其是肥大船型，艏部收缩剧烈，会造成艏部伴流不均匀，影响螺旋桨的推进效率。

针对以上这些问题，本章将对典型的低速肥大船 JBC 标模进行线型优化。

4.2 优化对象描述

JBC 是日本国家海洋研究所（NMRI），横滨国立大学以及日本造船研究中心（SRC）联合设计的一艘海岬型散货船，目前已被作为标模，船模主要船型参数见表 4-1，模型示意图见图 4-1。



图 4-1 JBC 船模示意图
Fig.4-1 JBC model

表 4-1 JBC 船模主尺度要素表
Table 4-1 Hull data of JBC

项目	符号	单位	实船	模型
垂线间长	L_{PP}	m	280	7
水线长	L_{WL}	m	285	7.125
型宽	B	m	45	1.125
吃水	T	m	16.5	0.4125
方形系数	C_B	—	0.8580	0.8580
排水体积	∇	m^3	178369.9	2.787
湿表面积	S_w	m^2	19556.1	12.22

4.3 性能评估的可靠性验证

对于低速肥大船，NM 数值方法不再适用，原因是该数值方法无法识别粘压阻力的变化，因此本章将以粘流方法作为性能评估手段。在进行线型优化之前，首先采用 2.2 节介绍的基于 RANS 方法的粘流水动力性能求解器 naoe-FOAM-SJTU 对 JBC 的静水阻力进行数值模拟，并与试验结果进行对比，以保证 JBC 性能评估的可靠性。

4.3.1 计算区域及网格划分

计算域大小为 $-L_{pp} < X < 3.5 L_{pp}$ ， $0 < Y < 1.5 L_{pp}$ ， $-L_{pp} < Z < 0.5 L_{pp}$ （船体部分范围为 $-0.5 L_{pp} < X < 0.5 L_{pp}$ ），网格划分及加密情况如图 4-2 所示。其中船体附近一定范围内的网格进行加密，自由面附近的网格也进行加密，另外艏艉部网格进行适当加密，船体表面第一层网格厚度根据 y^+ 确定（约为 40），计算区域的网格单元总数约为 150 万（采用半域计算）。

在优化过程中，几何重构使得船体形状发生变化，但其网格拓扑结构应保持不变，保证不同船型方案进行阻力预报时所采用的计算网格基本相同，以减少由于网格差异带来的数值计算“噪声”。

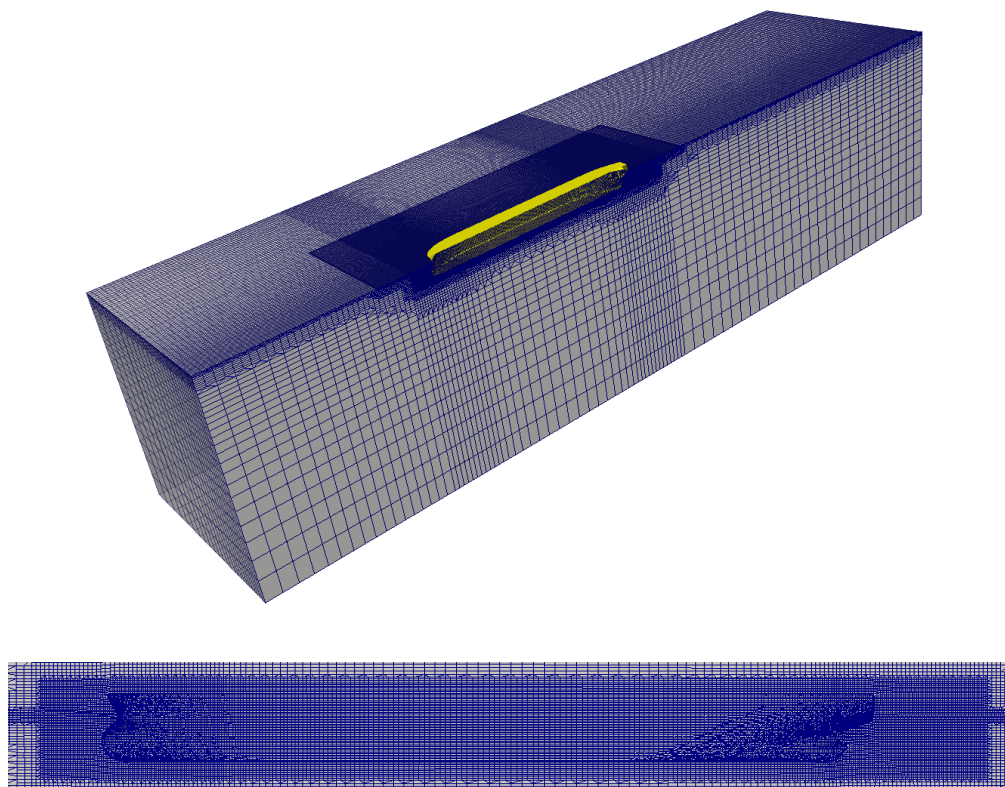


图 4-2 计算域网格划分及加密
Fig.4-2 Grid partition and refinement

4.3.2 数值计算结果的模型试验验证

对 JBC 船模在 $Fr = 0.142$ 的总阻力进行数值计算，并与试验结果进行对比，总阻力系数 C_t 按如下公式计算：

$$C_t = \frac{R_t}{0.5\rho V^2 S} \quad (4.1)$$

其中 R_t 为总阻力， ρ 为水的密度取 998.2 kg/m^3 ， V 为船模速度为 1.179 m/s ， S 为船模在静水中的湿表面积，另外水的粘度 ν 取 $1.107\text{e-}6 \text{ m}^2/\text{s}$ ，重力加速度 g 取 9.80m/s^2 ，均与试验值保持一致。

JBC 总阻力数值计算结果与试验结果的对比如表 4-2 所示。从表中可以看出，数值计算结果误差较小，仅相差 0.504%。图 4-3 是 JBC 船模波形图与模型试验结果对比，从图中可以看出，数值计算的波形与试验结果基本一致，吻合良好。图 4-4、4-5、4-6 分别是 JBC 船模桨盘面附近三个切面 ($X / L_{PP} = 0.9625$, $X / L_{PP} = 0.9843$, $X / L_{PP} = 1$) 的无因次轴向速度分布数值计算结果与试验结果对比，可以看到数值计算结果与试验结果吻合良好，尤其是“钩状”亦精确捕捉。

从 JBC 船模阻力、兴波以及桨盘面附近无因次化轴向速度的数值计算结果与试验结果的比较表明，本次优化所采用的数值计算方法具有较高的精度。

表 4-2 JBC 船模总阻力数值计算结果与试验结果比较
Table 4-2 Comparison of total resistance between RANS and Exp.

Fr	V (m/s)	Re (10 ⁶)	RANS				Exp. C _t (10 ⁻³)	误差
			R _p (N)	R _f (N)	R _t (N)	C _t (10 ⁻³)		
0.142	1.179	7.46	10.24	26.59	36.83	4.267	4.289	-0.504%

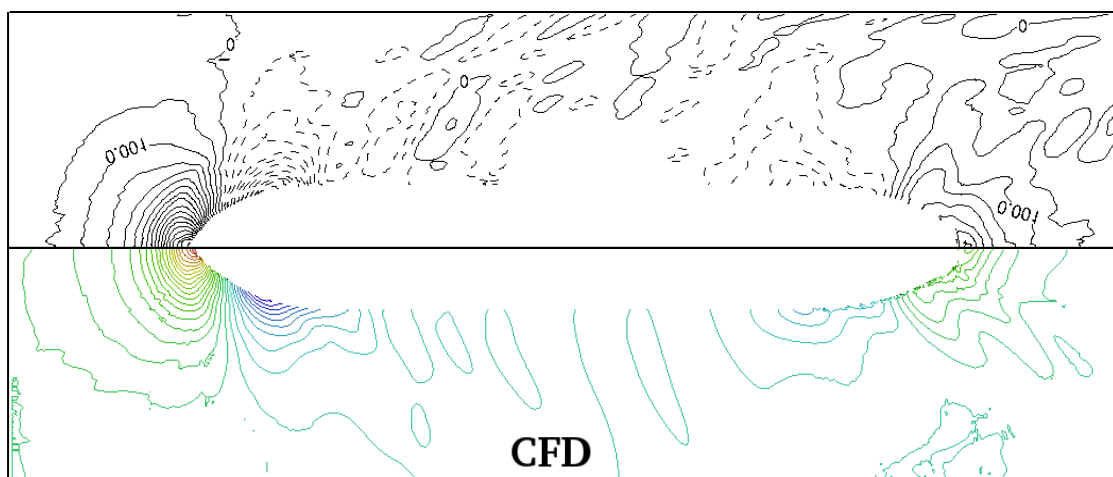


图 4-3 JBC 船模兴波图与模型试验结果比较
Fig.4-3 Comparison of wave pattern between CFD and Exp.

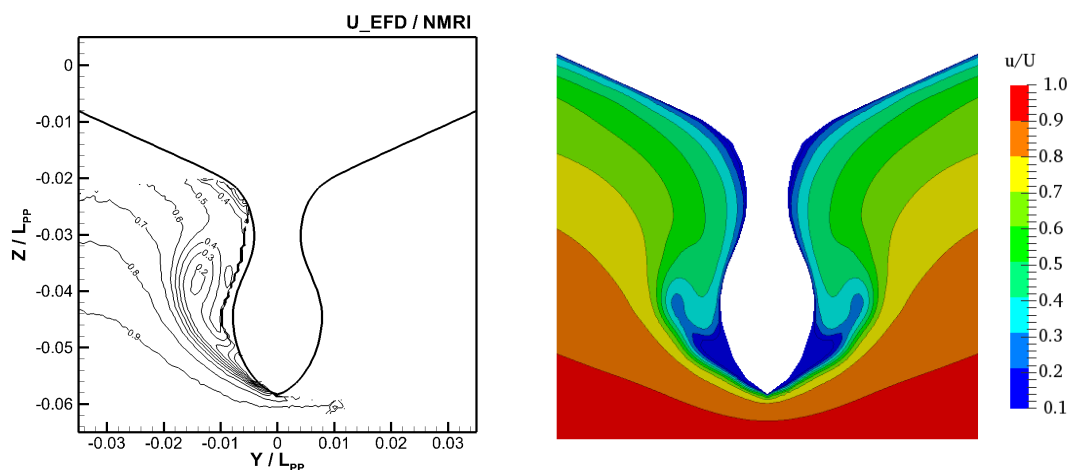


图 4-4 JBC 船模无因次轴向速度分布数值计算与模型试验结果比较 ($X / L_{PP} = 0.9625$)
Fig.4-4 Comparison of u/U between CFD and Exp. ($X / L_{PP} = 0.9625$)

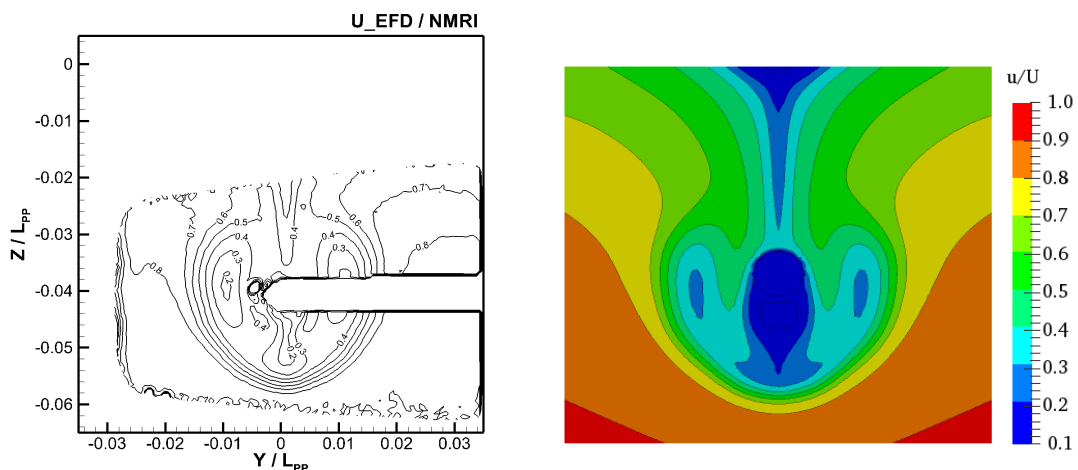


图 4-5 JBC 船模无因次轴向速度分布数值计算与模型试验结果比较 ($X / L_{pp} = 0.9843$)
Fig.4-5 Comparison of u/U between CFD and Exp. ($X / L_{pp} = 0.9843$)

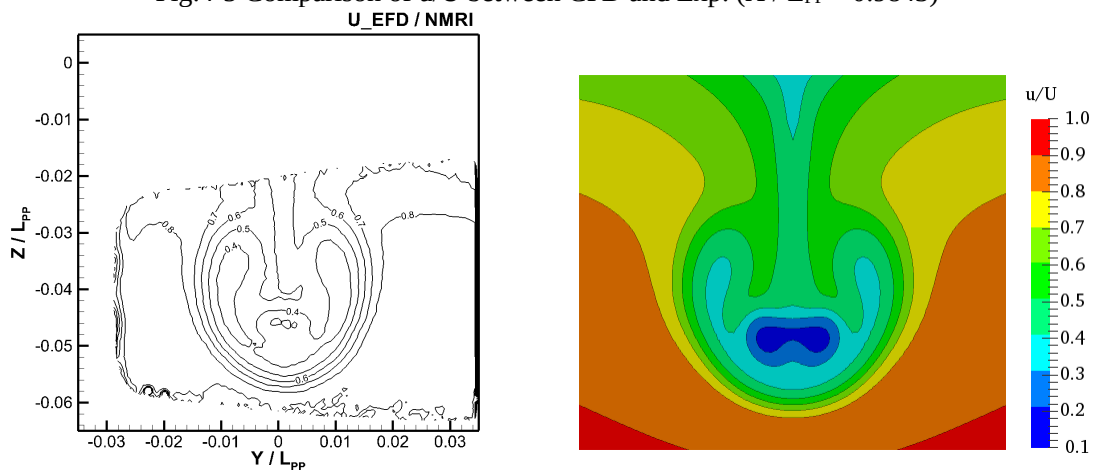


图 4-6 JBC 船模无因次轴向速度分布数值计算与模型试验结果比较 ($X / L_{pp} = 1$)
Fig.4-6 Comparison of u/U between CFD and Exp. ($X / L_{pp} = 1$)

4.4 JBC 艏部线型优化的尝试

由于 JBC 属于肥大船型，方形系数较大，平行中体较长，因此主要对 JBC 艏部进行几何重构。本章首先选择 JBC 艏部作为线型优化的区域，如图 4-7 所示。



图 4-7 JBC 艏部线型优化区域
Fig.4-7 Hull modification area



4.4.1 优化问题的定义

(1) 目标函数

以设计航速下 ($Fr = 0.142$) 的总阻力最小优化目标, 目标函数如下:

$$F = R_t / R_{t0} \quad (4.2)$$

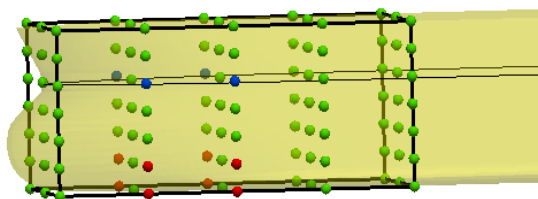
式中, R_t 为重构船型的总阻力, R_{t0} 为原型总阻力。

(2) 几何重构方法及设计变量选取

采用与 KCS 前体线型优化相同的重构方法 (详见 3.4.1 节), 此处不再赘述。但是由于 JBC 属于肥大船型, 方形系数较大, 平行中体较长, 因此须对相关参数进行合理调整。

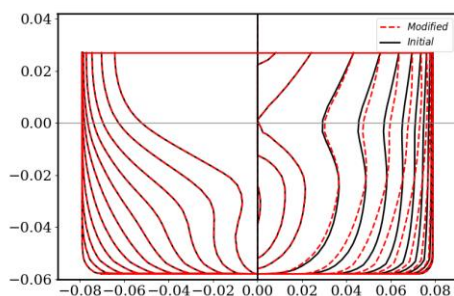
平移法参数 $x_{1f} = 0.3$, $x_{2f} = 0.53$ (修改范围为 $0.3 \sim 0.53$), α_{1f} (形状修改函数幅值)、 α_{2f} (不动点) 仍作为 2 个设计变量。

FFD 方法仍采用 3 个 Lattice 对不同区域进行几何重构, 但 Lattice 的大小范围及移动控制点的选取需做合理调整 (图 4-8、图 4-9), 特别是球艏沿船宽方向变形时, 由于 JBC 球艏过于肥大, 且一直向后延伸到平行中体, 因此 Lattice 范围应适当取大, 且移动控制点应适当靠前, 以保证变形过渡区的型线光顺, 变形效果如图 4-10 所示。FFD 方法共 5 个设计变量: $Y1$, $Y2$, $X1$, $Z1$, $Y3$ 。



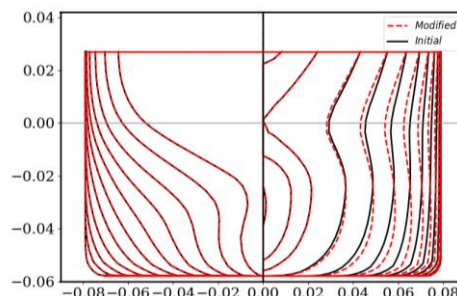
a) Lattice1 范围大小及控制点分布 ($Y1$ & $Y2$)

a) Lattice1 and control points ($Y1$ & $Y2$)



b) 横剖面往“V 型”变化

b) Transformation into “V” section



c) 横剖面往“U 型”变化

c) Transformation into “U” section

图 4-8 Lattice1 控制横剖面形状

Fig.4-8 Lattice1 modify section shape

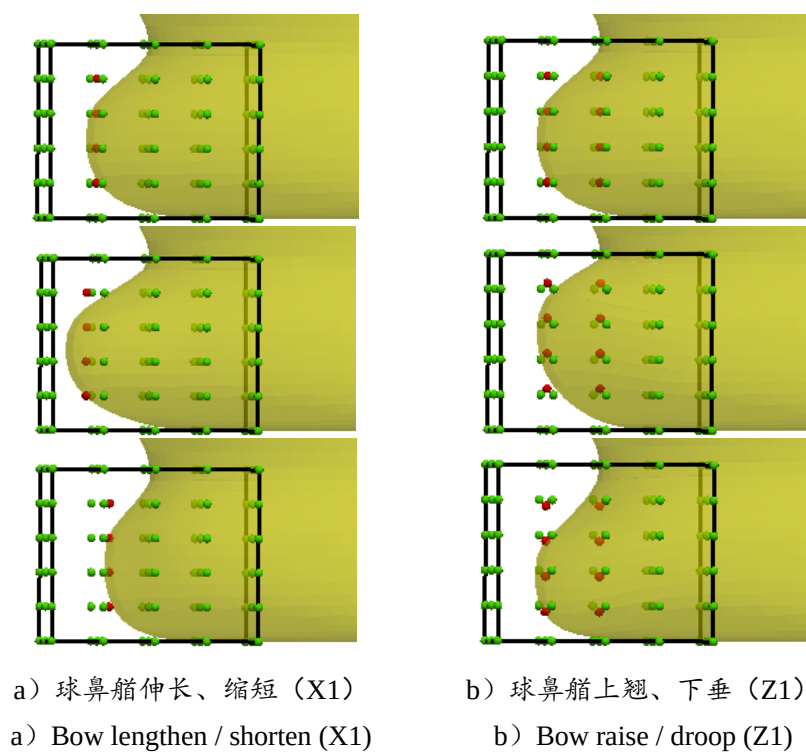


图 4-9 Lattice2 控制球鼻艏形状 (上方为原型, 中下为变型)
Fig.4-9 Lattice2 modify bow shape (Up original, Mid & Down modified)

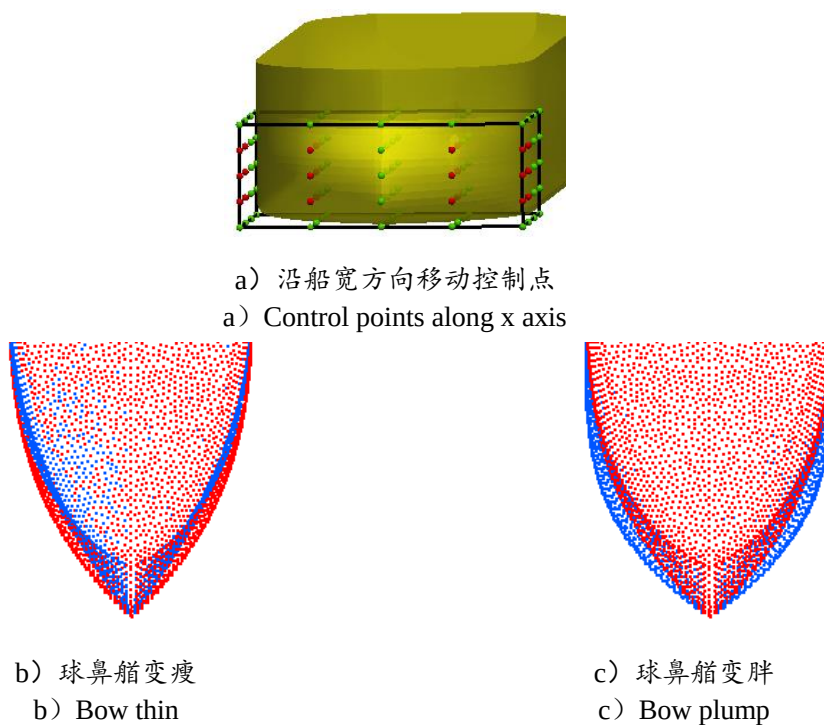


图 4-10 Lattice3 大小范围、移动控制点及球艏变形效果
Fig.4-10 Lattice3 and control points (modify bow shape)



(3) 约束条件及优化策略

本次优化通过优化拉丁方试验设计方法在设计变量范围内均匀选取 56 个样本点（部分设计变量之间的均匀性正交性分布见图 4-11），并构建 Kriging 近似模型，采用遗传算法求解最优船型。约束条件及遗传算法参数见表 4-3。

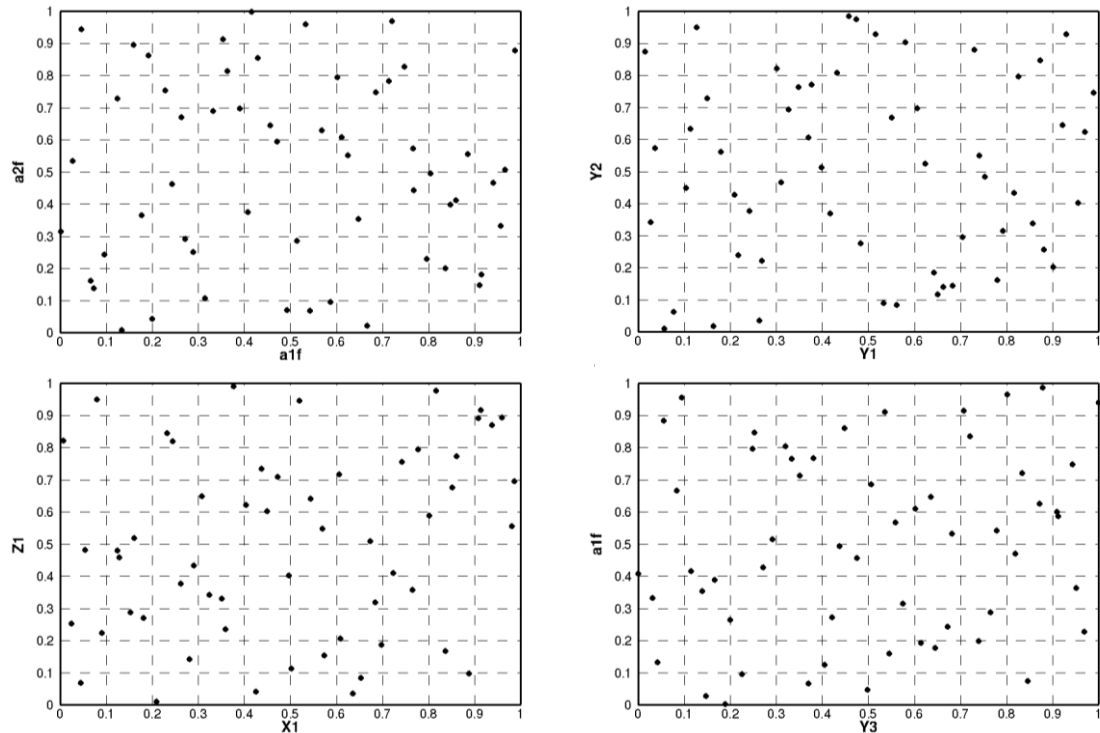


图 4-11 OLHD 试验设计部分设计变量之间的均匀性正交性分布
Fig.4-11 OLHD experimental design

表 4-3 JBC 艏部线型优化问题的定义
Table 4-3 Definition of the optimization problem

项目	定义	备注
目标函数	$F = R_t / R_{t0}$	$Fr = 0.142$
设计变量		
α_{1f}	$[-0.005, 0.005]$	平移法幅值
α_{2f}	$[0.3, 0.4]$	平移法不动点
Y1	$[-0.02, 0.02]$	艤部 y 向移动量
Y2	$[-0.02, 0.02]$	水线 y 向移动量
X1	$[-0.02, 0.02]$	球艏 x 向移动量
Z1	$[-0.02, 0.02]$	球艏 z 向移动量
Y3	$[-0.003, 0.003]$	球艏 y 向移动量



表 4-3 JBC 艏部线型优化问题的定义（续）
Table 4-3 Definition of the optimization problem (continued)

项目	定义	备注
约束条件		
主尺度	固定不变	Lpp, B, T
∇	变化不超过 $\pm 1\%$	排水体积
S_{wet}	变化不超过 $\pm 0.5\%$	湿表面积
优化策略		
试验设计	OLHS	样本数 56
近似模型	Kriging	
优化算法	GA	
种群大小	60	
交叉率	0.8	
变异率	0.2	
最大迭代次数	200	

4.4.2 优化结果及分析

数值计算共使用 8 个节点，每个样本船型阻力评估需 24 小时/节点，整个优化共用时 168 个小时（7 天）。

在迭代到第 150 次时，各个设计变量已经基本上收敛，目标函数已达到了最小值。目标函数及其各个设计变量的在优化过程中的收敛过程如图 4-12 所示，最优方案所对应的目标函数、设计变量收敛值见表 4-4。

表 4-4 最优方案
Table 4-4 Optimal solution

α_{1f}	α_{2f}	Y1	Y2	X1	Z1	Y3	F	∇	S_{wet}
-0.0031	0.38737	0.0139	-0.0191	0.0140	-0.0184	0.00053	0.995	0.036%	0.041%

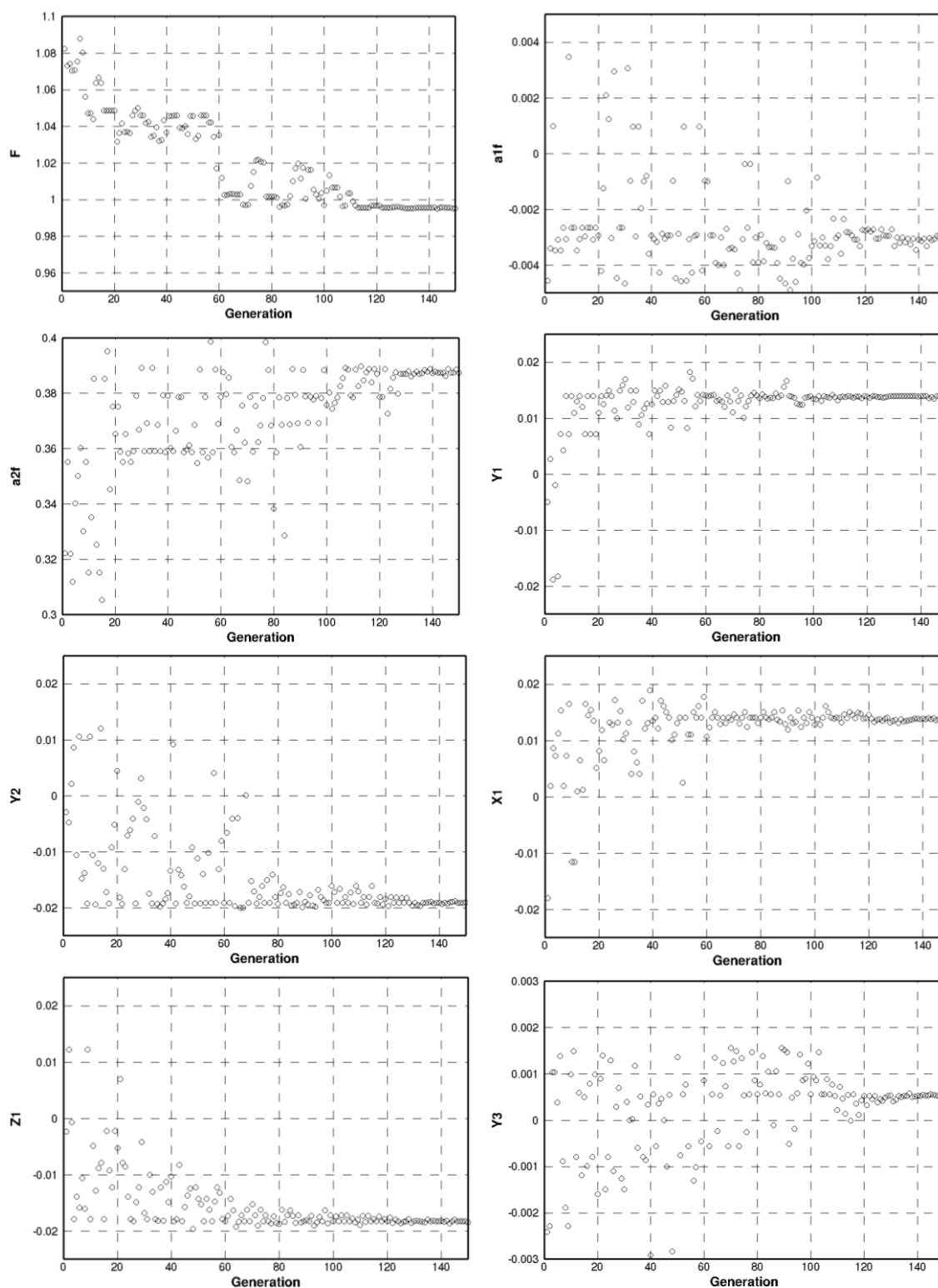


图 4-12 目标函数及设计变量收敛过程
Fig.4-12 Convergence of objective function and design variables



优化结果表明，最优方案总阻力降幅很小，仅减小 0.5%。最优方案的型线如图 4-13 所示，水线肩部型线向外扩张，艏部内收，球鼻艏略微伸长且下垂。对优化方案进行数值计算验证，阻力成分变化见表 4-5，结合波形对比（图 4-14），船侧波高对比（图 4-15）以及压力对比（图 4-16）分析其原因如下：

①从波形及船侧波高对比来看，兴波略有减小但不明显，原因是低速肥大船本身兴波较小，而且球鼻艏过于肥大，在约束条件下很难产生明显的有利兴波干扰，而且低速肥大船安装球鼻艏的原因也并非产生有利兴波干扰，而是通过整流的作用减少艏部艏涡的产生，从而改善“埋首”现象。因此，通过艏部线型优化减小兴波阻力是较为困难的。

②从压力对比来看，优化方案的压力分布与原始方案并无差异，船体纵向压力梯度变化不大，即粘压阻力变化不大。主要原因是 JBC 艏部型线变化平缓，而艏部型线收缩剧烈，通过原始船型的涡量等势面图（图 4-17）可以看到 JBC 艏部存在明显的流动分离现象，这会导致粘压阻力的增大。然而 JBC 艏部较丰满，在约束条件下的变型难以缓解艏部的流动分离。

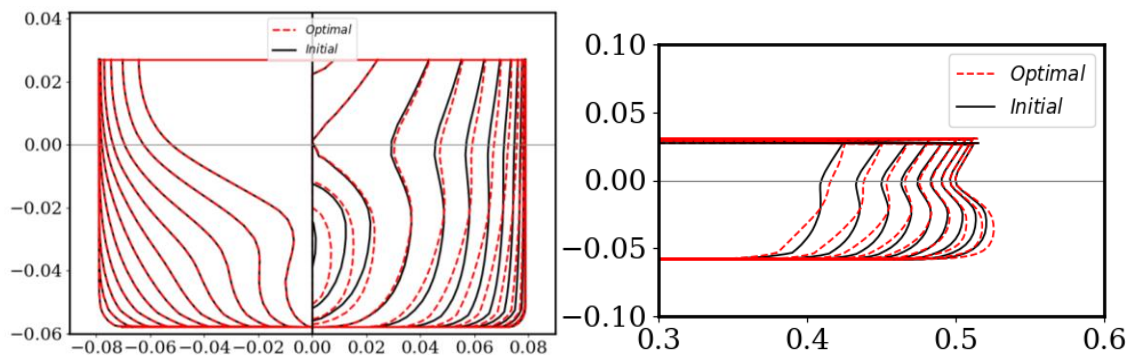


图 4-13 优化方案与原始方案型线对比
Fig.4-13 Comparison of hull form lines between original and optimal design

表 4-5 优化方案阻力成分变化
Table 4-5 Variation of resistance

	$R_p(N)$	$R_f(N)$	$R_t(N)$
原始方案	10.24	26.59	36.83
优化方案	10.02	26.62	36.64
阻力变化	-2.148%	0.113%	-0.516%

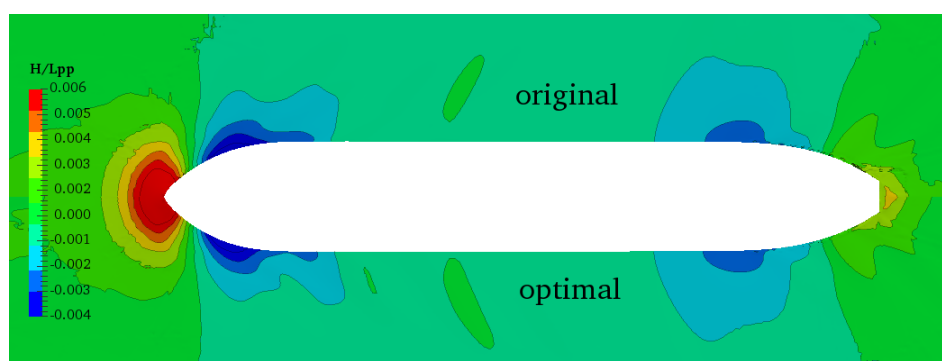


图 4-14 优化方案与原始方案兴波对比

Fig.4-14 Comparison of wave pattern between original and optimal design

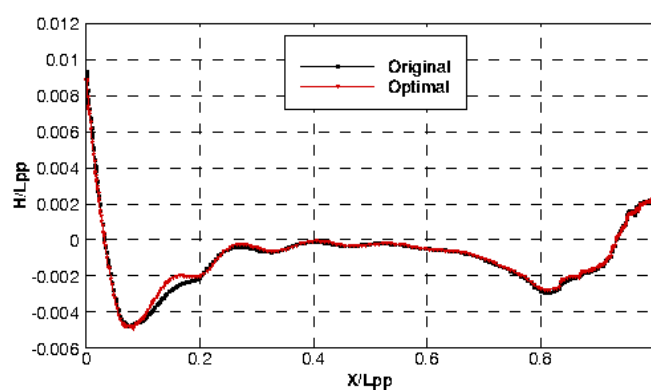


图 4-15 优化方案与原始方案船侧波高对比

Fig.4-15 Comparison of wave height along hull between original and optimal design

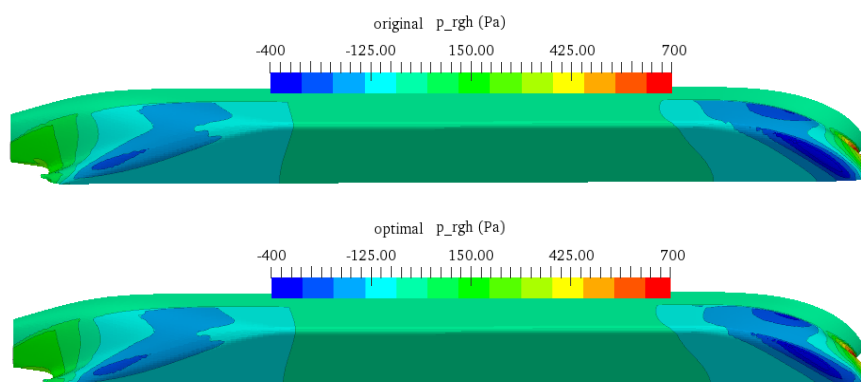


图 4-16 优化方案与原始方案船体表面压力对比

Fig.4-16 Comparison of wave pattern between original and optimal design

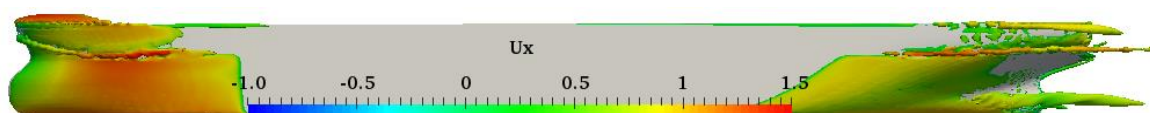


图 4-17 原始方案涡量等势面 ($Q = 20$)

Fig.4-17 Vortex isosurface of original design ($Q = 20$)



4.5 JBC 艤部线型优化

JBC 船艤部型线收缩剧烈，通过原始船型的涡量等势面图发现艤部存在明显的流动分离，这会导致粘压阻力的增大；同时艤部线型对螺旋桨的伴流影响很大，从而影响螺旋桨的推进效率。因此，本节将对 JBC 的艤部线型进行优化，如图 4-18 所示。



图 4-18 JBC 艤部线型优化区域
Fig.4-18 Hull modification area

4.5.1 叠模方法评估 JBC 阻力的可行性

相比于艏部形状，艤部形状对自由面的影响要更小，因此可以采用叠模方法来评估阻力。表 4-6 给出了叠模方法计算所得阻力成分与计及自由面计算所得阻力成分对比，其中压阻力的差异主要是由于考虑自由面时的兴波阻力成分，摩擦阻力的差异主要是由于船侧兴波引起的湿表面积变化。在约束条件下艤部线型的变化对自由面的影响不大，等价于计及自由面时阻力的增加量变化不大，因此将叠模方法计算的阻力作为优化目标是合理的（同样的，本文会对优化方案和原始方案的这部分阻力增量及其变化幅度进行计算分析，以验证叠模方法的可行性）。计及自由面时评估一次总阻力需要大约为 24 小时/节点，而叠模方法进行一次评估仅需约 4 小时/节点，计算效率大大提高。

表 4-6 叠模方法与计及自由面时计算的阻力成分差异
Table 4-6 Resistance increment considering free surface

	Rp(N)	Rf(N)	Rt(N)
叠模方法	8.673	25.86	34.53
计及自由面	10.24	26.59	36.83

4.5.2 阻力单目标优化

(1) 优化问题的定义

① 目标函数

以设计航速下 ($Fr = 0.142$) 的总阻力最小优化目标，目标函数如下：

$$F = R_t / R_{t0} \quad (4.3)$$

式中， R_t 为重构船型的叠模总阻力， R_{t0} 为母型船的叠模总阻力。

②几何重构方法及设计变量选取

JBC 艉部几何重构采用 FFD 方法，采用组合式的控制点，前后各取三组移动控制点，分别沿船长（X 轴）、船宽（Y 轴）、吃水（Z 轴）三个方向移动，共 6 个设计变量： $X1, Y1, Z1, X2, Y2, Z2$ ，如图 4-19 所示，各个设计变量的取值范围见表 4-7。这 6 组移动控制点能组合出丰富多样的重构船型，重构效果如图 4-20 所示。

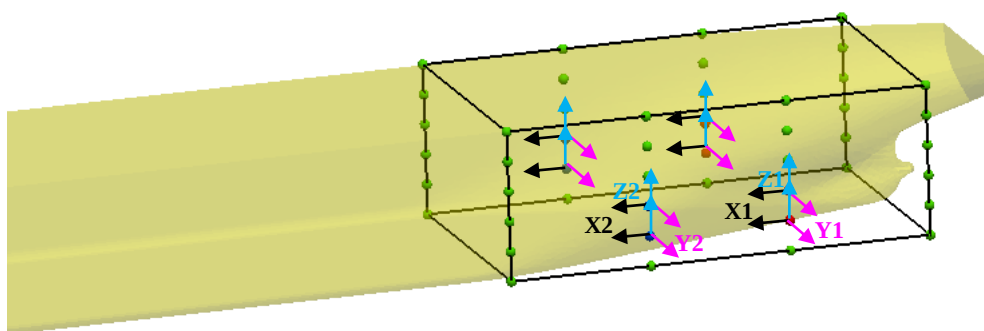


图 4-19 FFD 移动控制点及设计变量
Fig.4-19 FFD control points and design

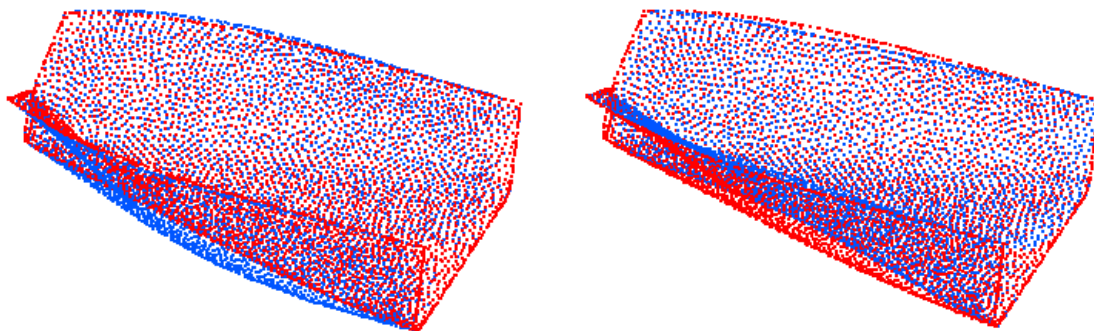


图 4-20 JBC 艉部几何重构（FFD 方法）
Fig.4-20 JBC stern deformation (FFD)

③约束条件及优化策略

本次优化通过优化拉丁方试验设计方法在设计变量范围内均匀选取 48 个样本点（部分设计变量之间的均匀性正交性分布见图 4-21），并构建 Kriging 近似模型，采用遗传算法求解最优船型。约束条件及遗传算法优化参数详见表 4-7。

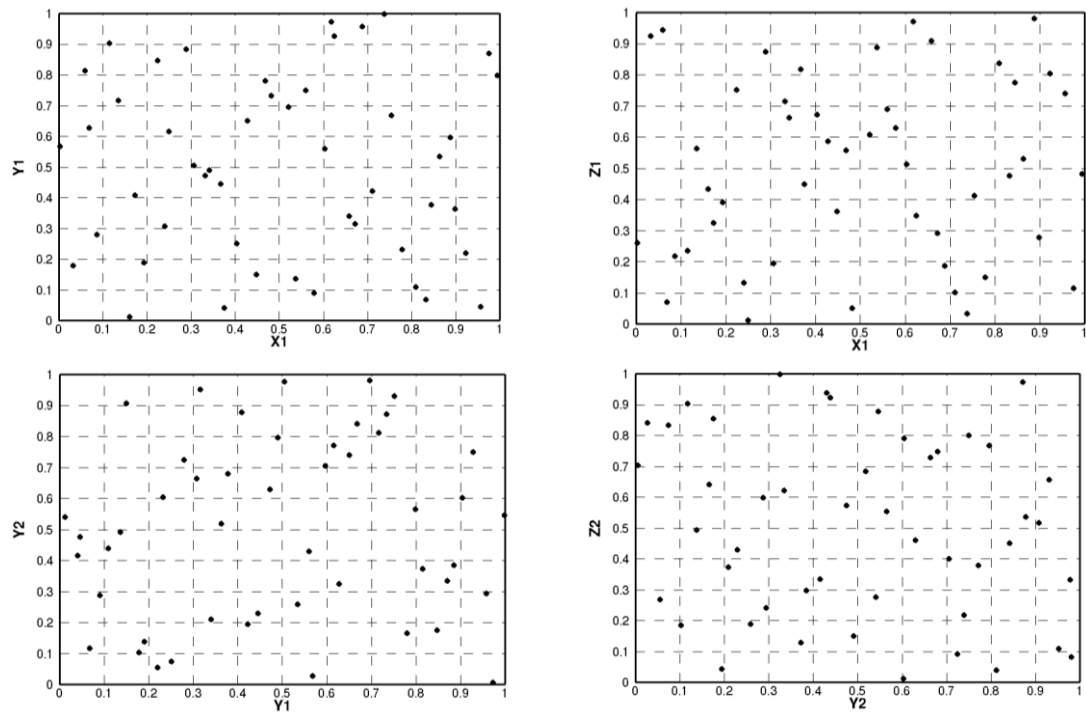


图 4-21 OLHD 试验设计部分设计变量之间的均匀性正交性分布
Fig.4-21 OLHD experimental design

表 4-7 JBC 艤部线型单目标优化问题的定义
Table 4-7 Definition of the optimization problem

项目	定义	备注
目标函数	$F = R_t / R_{t0}$	$Fr = 0.142$
设计变量		
X1	$[-0.02, 0.02]$	尾部控制点 x 向移动量
Y1	$[-0.03, 0.05]$	尾部控制点 y 向移动量
Z1	$[-0.02, 0.01]$	尾部控制点 z 向移动量
X2	$[-0.02, 0.02]$	后肩控制点 x 向移动量
Y2	$[-0.07, 0.03]$	后肩控制点 y 向移动量
Z2	$[-0.02, 0.04]$	后肩控制点 z 向移动量
约束条件		
主尺度	固定不变	L_{pp}, B, T
∇	变化不超过 $\pm 1\%$	排水体积
S_{wet}	变化不超过 $\pm 0.5\%$	湿表面积



表 4-7 JBC 艏部线型单目标优化问题的定义（续表）
Table 4-7 Definition of the optimization problem (continued)

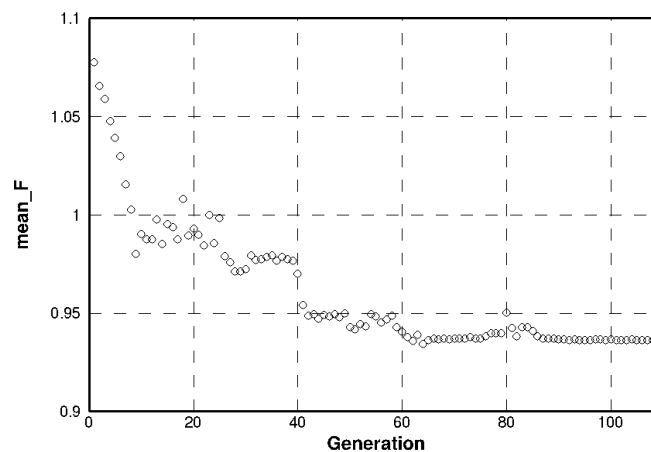
项目	定义	备注
优化策略		
试验设计	OLHS	样本数 48
近似模型	Kriging	
优化算法	GA	
种群大小	40	
交叉率	0.8	
变异率	0.2	
最大迭代次数	150	

（2）优化结果及分析

①优化结果

数值计算共使用 8 个节点，每个样本船型阻力评估需 4 小时/节点，整个优化仅用时 24 个小时，大大缩减了优化周期。

在迭代到第 110 次时，各个设计变量已经基本上收敛，目标函数已达到了最小值。目标函数及其各个设计变量的在优化过程中的收敛过程如图 4-22 所示，最优方案所对应的目标函数、设计变量收敛值见表 4-8。



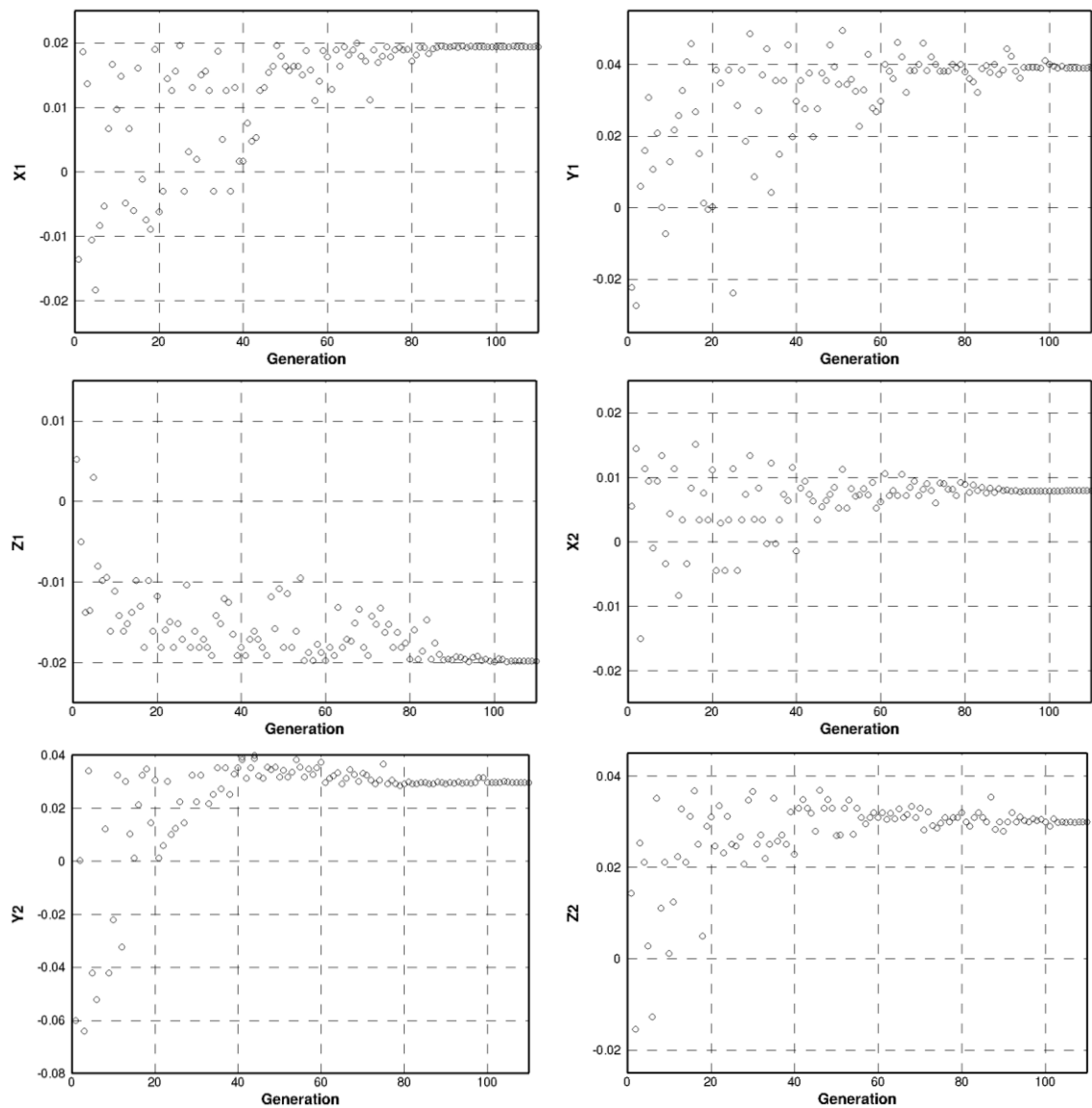


图 4-22 目标函数及设计变量收敛过程
Fig.4-22 Convergence of objective function and design variables

表 4-8 最优方案
Table 4-8 Optimal solution

X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	F	∇	S_{wet}
0.0194	0.0391	-0.0199	0.0081	0.0296	0.03	0.936	-0.83%	-0.36%

②叠模方法的可靠性验证

采用叠模方法和计及自由面方法对优化方案进行阻力评估，如表 4-9 所示。对于原始方案和优化方案，计及自由面时阻力的增加量的变化并不大，占比不到



1%，说明在低航速兴波较小且满足约束条件的情况下，艏部线型的变化对自由面的影响确实不大（图 4-24，4-25 的兴波对比亦能说明这一点），验证了叠模方法的可靠性；另外，叠模方法计算优化方案的总阻力下降 6.25%，与目标函数收敛值一致，说明 Kriging 近似模型是可靠的。

表 4-9 计及自由面时总阻力增加量在优化前后的变化
Table 4-9 Variation of increment with free surface

	叠模	计及自由面	计及自由面的增加量	变化
原始方案总阻力(N)	34.53	36.83	2.301	—
优化方案总阻力(N)	32.44	35.01	2.649	0.348

③优化方案型线及阻力性能分析

最终，计及自由面时优化方案阻力成分变化见表 4-10，总阻力下降 4.73%，其中压阻力下降 15.93%，摩擦阻力下降 0.41%是由于湿表面积의细微变化。

优化方案与原始方案型线对比如图 4-23 所示，优化方案水线附近后肩处的型线略微向外扩张，艏部靠近基线附近的型线明显内缩，排水体积的分布向上集中，横剖线“陡直”程度降低，艏部型线沿船长方向收缩更为平缓，排水量和湿表面积均满足约束条件。

表 4-10 优化方案阻力成分变化
Table 4-10 Variation of resistance

	$R_p(N)$	$R_f(N)$	$R_t(N)$
原始方案	10.24	26.59	36.83
优化方案	8.609	26.48	35.01
阻力变化	-15.93%	-0.41%	-4.73%

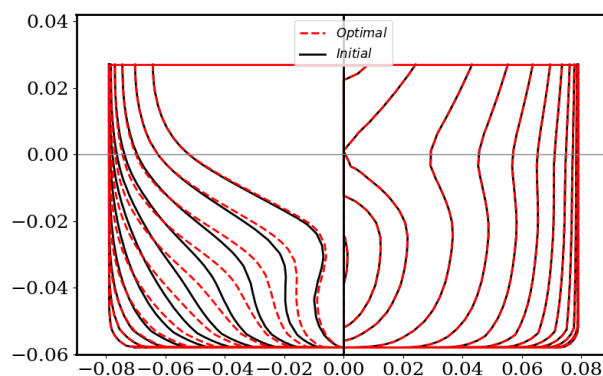


图 4-23 优化方案与原始方案型线对比

Fig.4-23 Comparison of hull form lines between original and optimal design

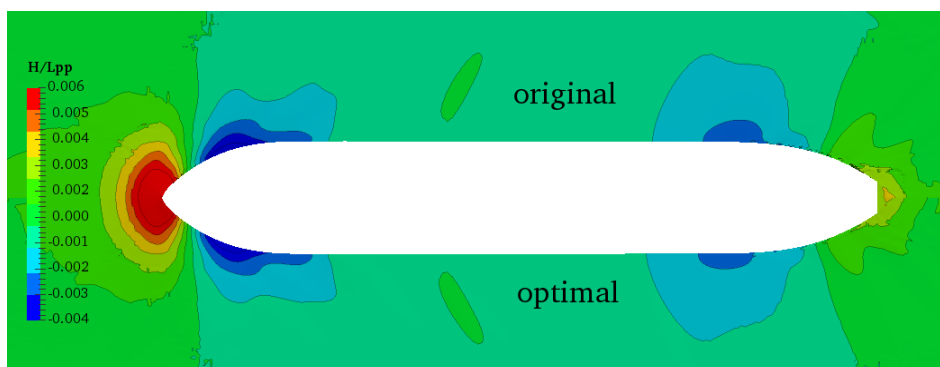


图 4-24 优化方案与原始方案兴波对比

Fig.4-24 Comparison of wave pattern between original and optimal design

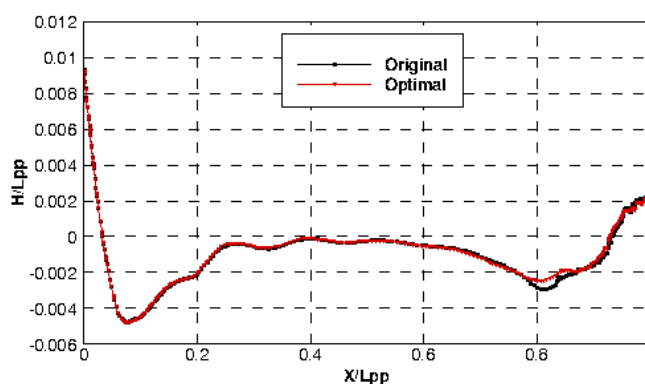


图 4-25 优化方案与原始方案船侧波高对比

Fig.4-25 Comparison of wave height along hull between original and optimal design

图 4-24 和 4-25 分别给出了优化方案与原始方案的波形对比和船侧波高对比，从图中可以看出，优化方案的自由面兴波变化很小，说明兴波阻力变化很小，而压阻力的大幅下降主要是由于粘压阻力的减小。

图 4-26 和 4-27 分别给出了优化方案与原始方案的船体表面压力分布对比和纵向压力分布对比 ($Z / L_{pp} = -0.0471$)；图 4-28 和 4-29 分别给出了两个截面 ($Z / L_{pp} = -0.0429$, $Y / L_{pp} = 0.0114$) 的无因次纵向速度云图对比，图 4-30 和 4-31 同时给出了这两个截面的涡量等值线对比，图 4-32 给出了涡量等势面对比，其中涡量按 Hunt 等^[103]建议的 Q 准则表示，Q 的定义如下：

$$Q = \frac{1}{2}(|\Omega|^2 - |S|^2) \quad (4.4)$$

式中， Ω 为涡量张量， S 为应变率张量。

从图 4-26 和 4-27 可以看出，优化方案船体艏部低压区明显减小， X / L_{pp} 在 0.7 ~ 0.9 之间纵向压力分布十分均匀，纵向压力梯度明显减小，这样可以减小因



纵向压力梯度和粘性对水流动能的耗散，从而减少艏部的流动分离以及涡流的产生；从图 4-28 和 4-29 可以明显看到原始方案在艏部因流动分离产生的低速区，而优化方案的低速区明显减小，说明流动分离得到了很大的改善；图 4-30，4-31 以及 4-32 的涡量对比更加直观地说明了优化方案艏部涡流大幅减少，艏部泻涡得到明显改善，使得粘压阻力大幅降低。

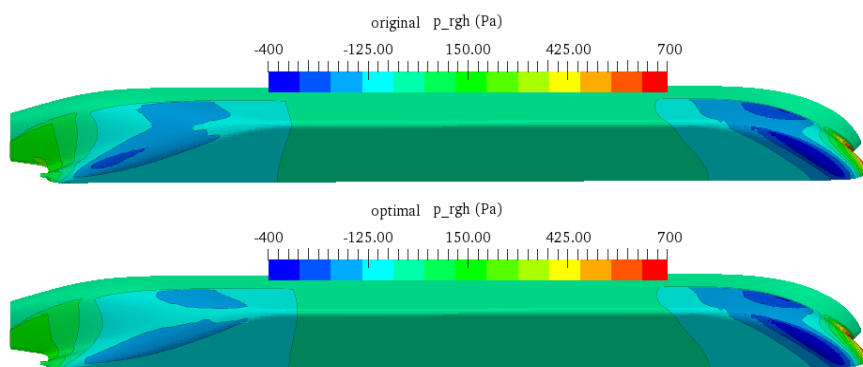


图 4-26 优化方案与原始方案船体表面压力对比

Fig.4-26 Comparison of wave pattern between original and optimal design

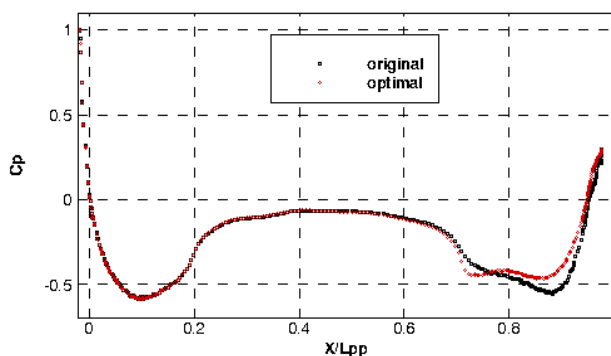


图 4-27 优化方案与原始方案船体表面纵向压力分布对比 ($Z / L_{pp} = -0.0471$)

Fig.4-27 Comparison of C_p between original and optimal design ($Z / L_{pp} = -0.0471$)

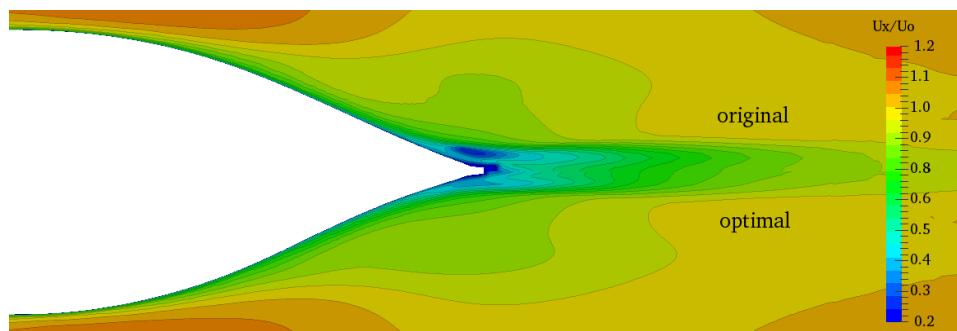


图 4-28 优化方案与原始方案无因次纵向速度云图对比 ($Z / L_{pp} = -0.0429$)

Fig.4-28 Comparison of U_x / U_o between original and optimal design ($Z / L_{pp} = -0.0429$)

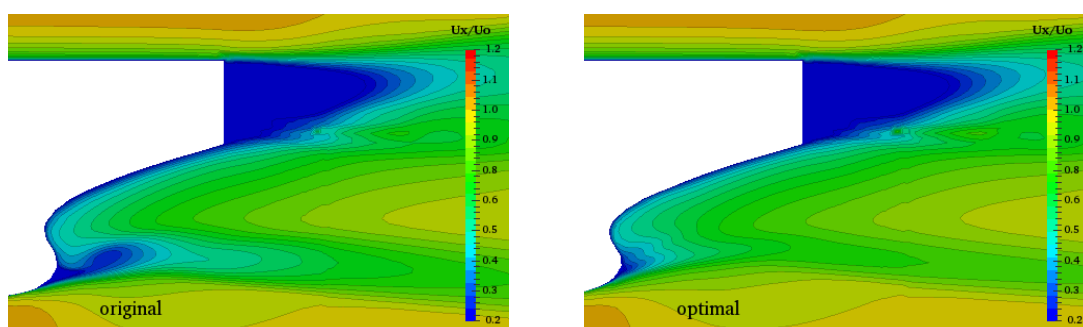


图 4-29 优化方案与原始方案无因次纵向速度云图对比 ($Y / L_{pp} = 0.0114$)
Fig.4-29 Comparison of U_x / U_o between original and optimal design ($Y / L_{pp} = 0.0114$)

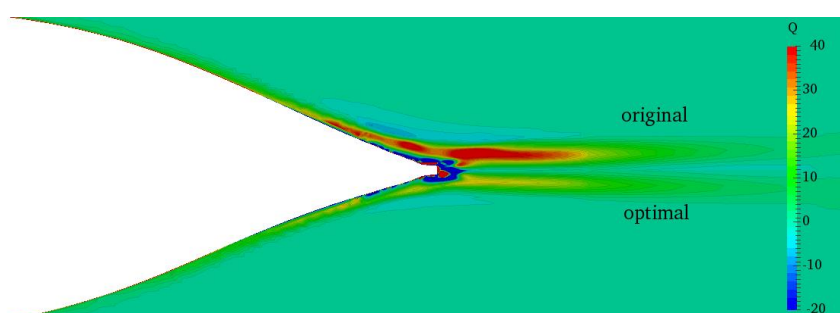


图 4-30 优化方案与原始方案涡量等值线对比 ($Z / L_{pp} = -0.0429$)
Fig.4-30 Comparison of Q between original and optimal design ($Z / L_{pp} = -0.0429$)

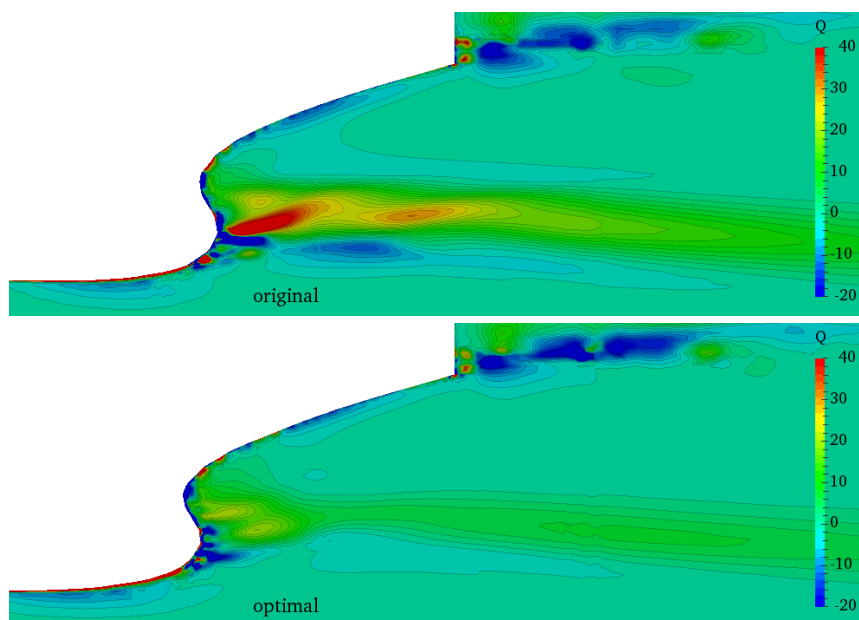
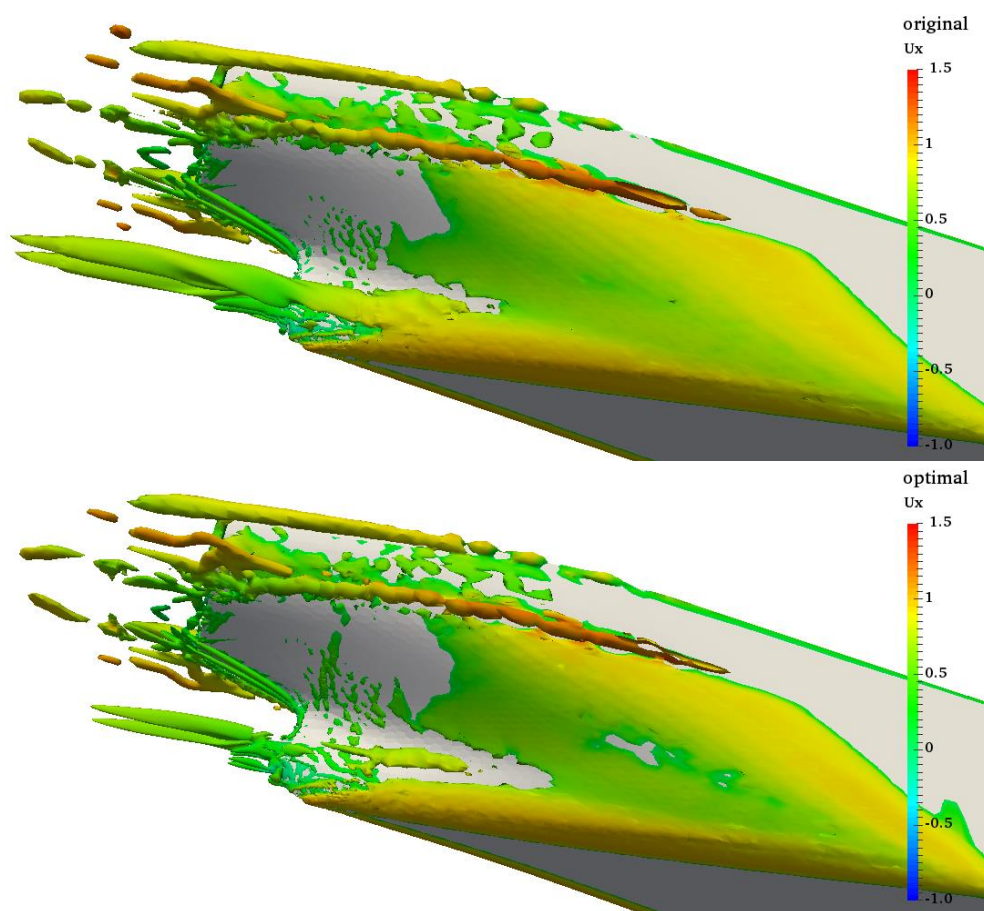


图 4-31 优化方案与原始方案涡量等值线对比 ($Y / L_{pp} = 0.0114$)
Fig.4-31 Comparison of Q between original and optimal design ($Y / L_{pp} = 0.0114$)

图 4-32 优化方案与原始方案涡量等势面对比 ($Q = 20$)Fig.4-32 Comparison of vortex isosurface between original and optimal design ($Q = 20$)

④优化方案伴流品质分析

原始方案桨盘面 ($X / L_{pp} = 0.9857$) 的无因次轴向速度云图见图 4-33, 优化方案桨盘面无因次轴向速度云图及与原始方案对比如图 4-34 所示。图 4-35 给出了优化方案和原始方案的桨盘面不同半径处无因次轴向速度均值, 从图中可以看出, 优化方案无因次轴向速度均值在外半径处 ($r / R = 0.7 \sim 1.2$) 明显大于原始方案, 但内半径处 ($r / R = 0.3 \sim 0.6$) 反而小于原始方案, 桨盘面无因次轴向速度的径向“波动”变大。图 4-36, 4-37 给出了优化方案和原始方案的桨盘面不同半径处 ($r / R = 0.3 \sim 1.2$) 无因次轴向速度周向分布, 从图中可以看出, 优化方案在 $r / R = 0.3 \sim 0.6$ 时的无因次轴向速度的周向“波动”比原始方案小, 在 $r / R = 0.7 \sim 1.2$ 时的无因次轴向速度的周向“波动”比原始方案大。

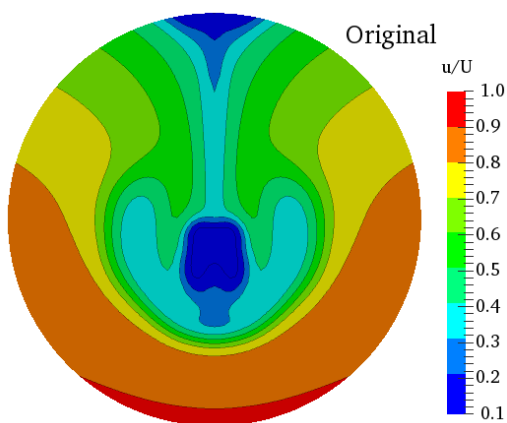


图 4-33 原始方案桨盘面的无因次轴向速度云图 ($X / L_{pp} = 0.9857$)
Fig.4-33 Contour of u/U at propeller disk of original design ($X / L_{pp} = 0.9857$)

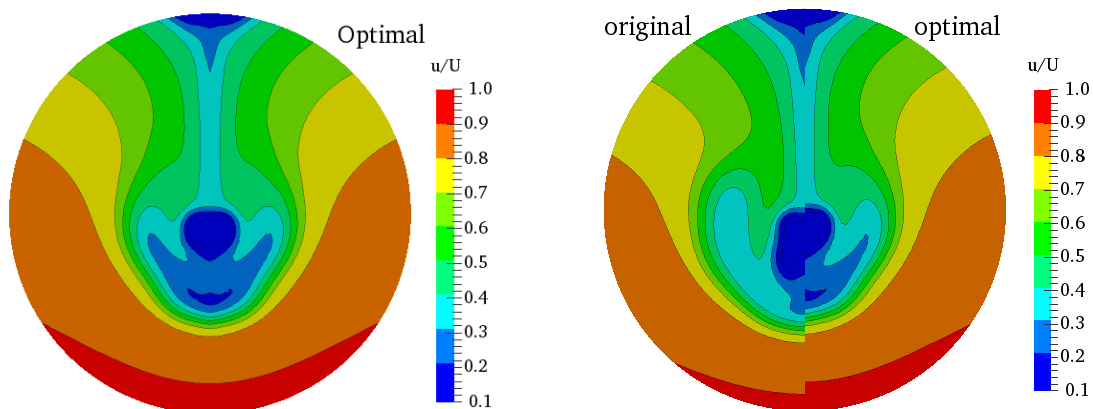


图 4-34 优化方案桨盘面的无因次轴向速度云图与原始方案对比
Fig.4-34 Contour of u/U at propeller disk of optimal design & comparison with original design

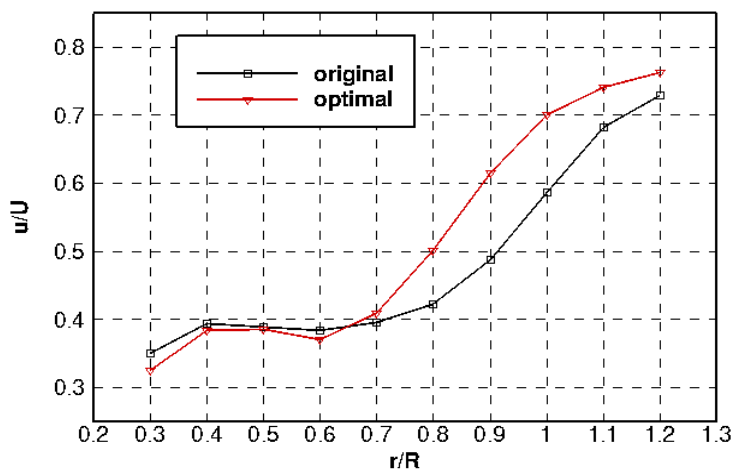


图 4-35 优化方案与原始方案桨盘面不同半径处无因次轴向速度均值对比
Fig.4-35 Comparison of mean u/U at various radius between original and optimal design



160043:2

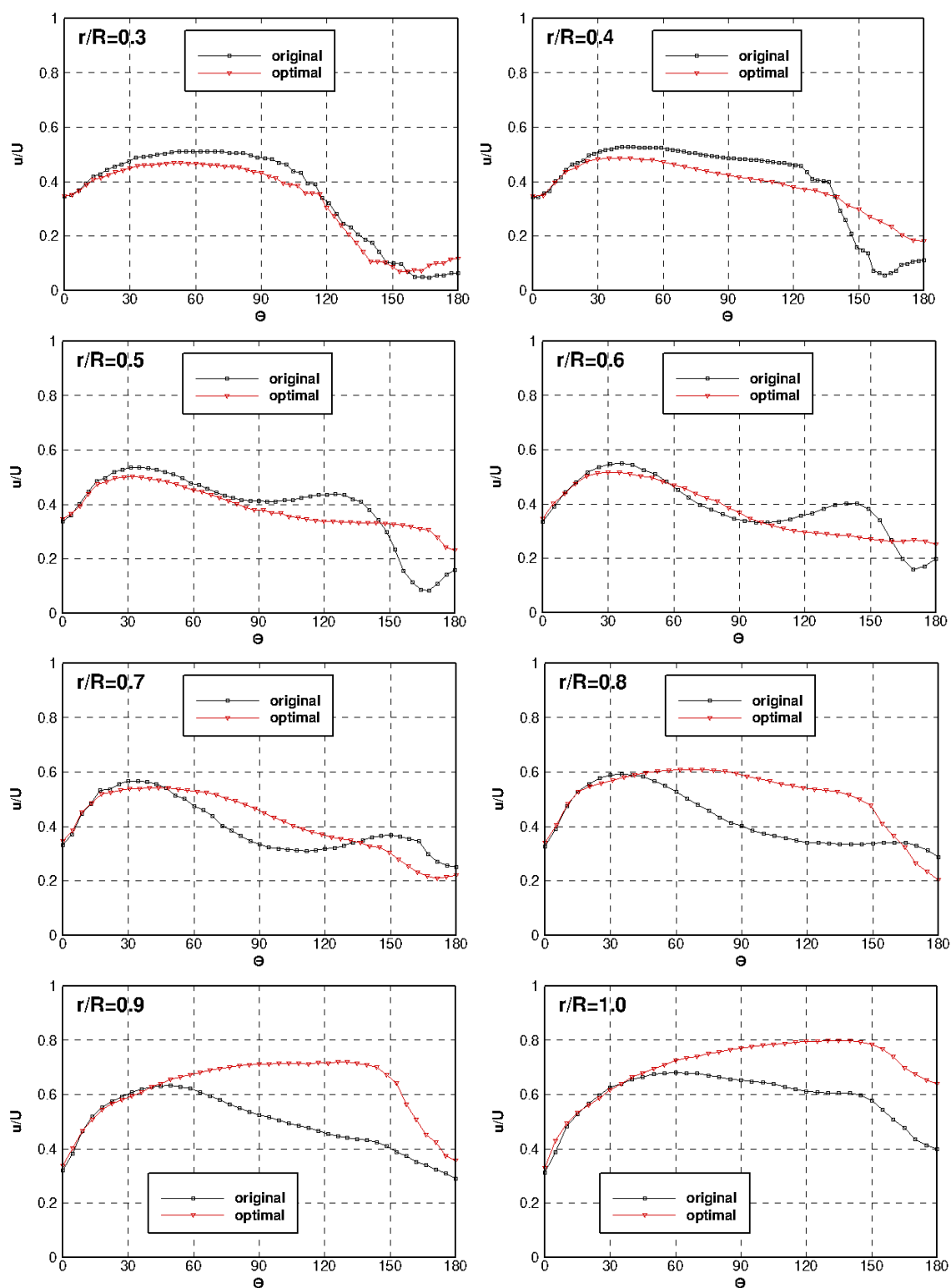


图 4-36 优化方案与原始方案桨盘面无因次轴向速度对比 ($r/R = 0.3 \sim 1.0$)
Fig.4-36 Comparison of u/U at propeller disk between original and optimal design ($r/R = 0.3 \sim 1.0$)

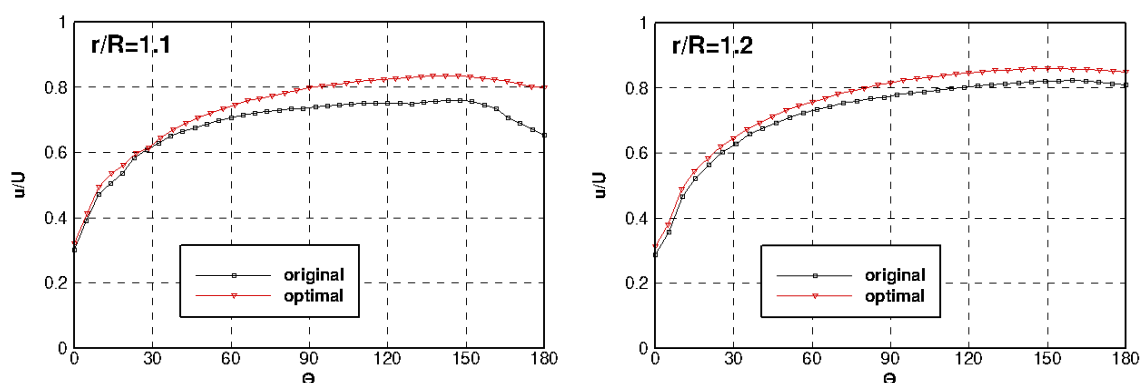


图 4-37 优化方案与原始方案桨盘面无因次轴向速度对比 ($r/R = 1.0 \sim 1.2$)

Fig.4-37 Comparison of u/U at propeller disk between original and optimal design ($r/R = 1.0 \sim 1.2$)

4.5.3 阻力&伴流多目标优化

(1) 优化问题的定义

从上节优化结果分析可以看出，船体艏部型线的变化对桨盘面的伴流品质影响很大，优化方案径向“波动”变大，进而直接影响螺旋桨的推进效率，因此在进行船体艏部优化时有必要考虑其对桨盘面流场的影响。本节分别以总阻力最小和桨盘面的伴流品质最优作为优化目标，进行 JBC 艏部几何重构的多目标优化。其中，桨盘面的伴流品质以其无因次轴向速度的不均匀度为指标进行评估，不均匀度越小则桨盘面的伴流品质越好，不均匀度指标按下式计算：

$$W_f = \sum_i^N \sqrt{\frac{1}{M} \sum_j^M (V_{xij} - \bar{V}_{xi})^2} \quad (4.5)$$

式中： $i = 3, 4, 5, \dots, 12$ 对应于桨盘面半径 $r = 0.3R, 0.4R, \dots, 1.2R$ ；

$j = 0, 1, 2, \dots, 90$ 对应于桨盘面 $\theta = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, \dots, 180^\circ$ （每 2° 取一点）；

V_{xij} ：表示桨盘面第 i 半径、第 j 角度处的无因次轴向速度；

$\bar{V}_{xi}$ ：表示桨盘面第 i 半径处的无因次轴向速度均值。

多目标优化的目标函数如下：

$$\begin{cases} F_1 = R_t / R_{t0} \\ F_2 = W_f / W_{f0} \end{cases} \quad (4.6)$$

式中， W_f 为重构船型的伴流不均匀度指标， W_{f0} 为母型船的伴流不均匀度指标。

本节进行多目标优化采用的几何重构方法、设计变量的选取、约束条件及试验设计等和单目标优化相同，可参见 4.5.2 节。以样本船型设计变量值和目标函数值构建 Kriging 近似模型，并采用基于帕累托解排序的多目标遗传算法 NSGA-II



求解最优船型，种群个体数为 100，交叉率 0.8，变异率 0.2，最大迭代次数 200。

(2) 优化计算结果及分析

① 优化结果

经过 150 次迭代后基本达到收敛，图 4-38 给出了目标函数 F1 和 F2 的 Pareto 前沿，可以看出 Pareto 前沿上个体分布均匀，种群的多样性良好。Pareto 前沿形状为“凸形”，说明两个目标函数是相互矛盾的关系：总阻力减小，伴流不均匀度相对增大；伴流不均匀度减小，总阻力相对增大。

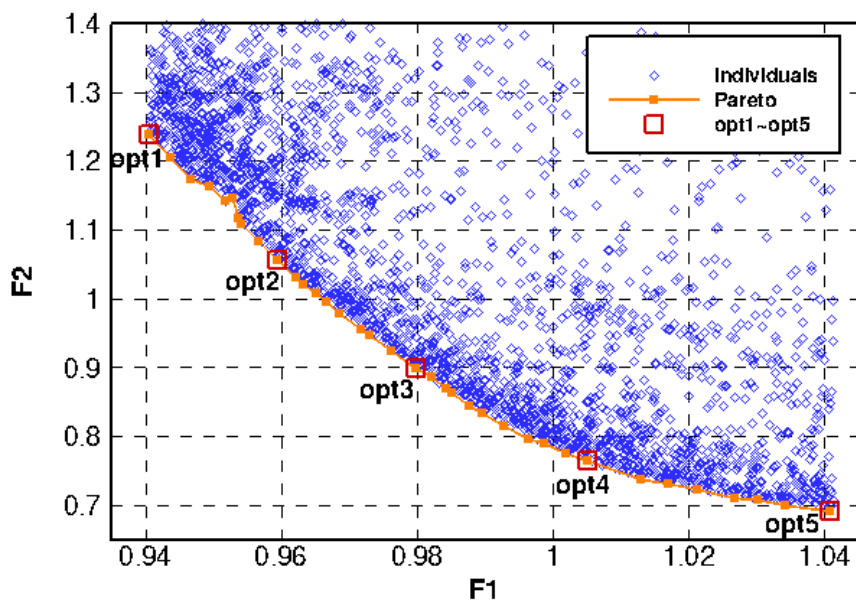


图 4-38 目标函数 F1 和 F2 的 Pareto 前沿
Fig.4-38 Pareto optimal solution set

② 叠模方法的可靠性验证&计及自由面阻力结果

在 Pareto 前沿上选取 5 个点：opt1 ~ opt5，各优化方案的目标函数、设计变量及约束值见表 4-11。叠模方法和计及自由面的计算结果对比见表 4-12，图 4-39：从表 4-12 可以看出，opt1 ~ opt5 计及自由面的阻力增量均与原始方案相近，变化很小；从图 4-39 可以看出，opt1 ~ opt5 计及自由面和叠模方法计算得到的 Pareto 前沿的形状基本一致，目标函数值基本相同，进一步说明了叠模方法的可靠性。

表 4-13 给出了 opt1 ~ opt5 计及自由面计算得到的阻力成分及桨盘面伴流不均匀度变化：纵向来看，opt1 ~ opt5 摩擦阻力均变化不大，主要原因是湿表面积变化不大，总阻力的变化主要在于压阻力；横向来看，阻力与桨盘面伴流不均匀度



呈现“相互矛盾”的状态；opt1 总阻力降幅最大 4.67%，其中压阻力减小 15.72%，但桨盘面伴流不均匀度增大 23.53%，伴流品质降低；opt5 伴流不均匀度降低 34.31%，但总阻力增大 4.209%；opt3 总阻力和桨盘面伴流不均匀度均有减小，总阻力降低 2.118%，其中压阻力降低 7.129%，伴流不均匀度减小 13.73%，伴流品质亦有所改善。

表 4-11 优化方案的目标函数、设计变量及约束值
Table 4-11 Values of objective function and design variables and constraints

参数	opt1	opt2	opt3	opt4	opt5
X1	0.0196	-0.0113	0.0123	-0.0078	0.0188
Y1	0.0407	0.0436	0.0497	0.0248	0.0334
Z1	-0.0198	-0.0164	0.0097	0.0071	0.0095
X2	0.0163	0.0086	-0.0172	0.0083	0.0146
Y2	0.0288	0.0178	-0.0488	-0.0474	-0.0694
Z2	0.0312	-0.0097	0.0376	0.0336	0.0389
F1	0.9395	0.9597	0.9756	1.0088	1.0393
F2	1.2263	1.0582	0.8885	0.7526	0.6943
$\Delta\nabla$	-0.825%	-0.466%	-0.609%	0.072%	-0.036%
ΔS_{wet}	-0.362%	-0.145%	-0.137%	0.097%	0.249%

表 4-12 叠模方法和计及自由面的计算结果对比
Table 4-12 Comparison of results with or without free surface

船型 方案	叠模方法		计及自由面		总阻力 (N)		计及自由面 总阻力增加 量 (N)
	F1	F2	F1	F2	叠模	计及自由面	
Original	1	1	1	1	34.53	36.83	2.30
Opt1	0.9395	1.2263	0.9533	1.2346	32.44	35.11	2.67
Opt2	0.9597	1.0582	0.9663	1.0738	33.14	35.59	2.45
Opt3	0.9756	0.8885	0.9789	0.8628	33.69	36.05	2.36
Opt4	1.0088	0.7526	1.0102	0.7264	34.83	37.21	2.38
Opt5	1.0393	0.6943	1.0421	0.6576	35.89	38.38	2.49

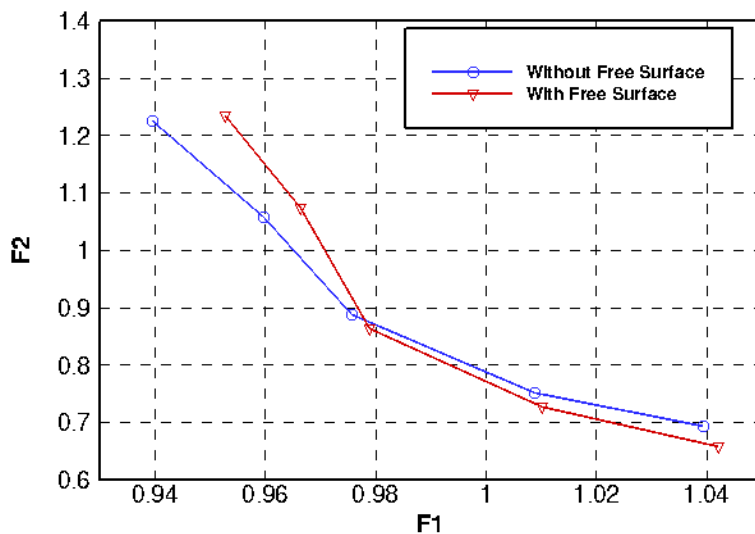


图 4-39 叠模方法与计及自由面 Pareto 前沿对比
Fig.4-39 Comparison of Pareto optimal solution set with or without free surface

表 4-13 计及自由面计算的阻力成分及桨盘面伴流不均匀度变化
Table 4-13 Comparison of resistance and flow unevenness

船型 方案	阻力						伴流不均匀度	
	R_f (N)	变化	R_p (N)	变化	R_t (N)	变化	W_f	变化
Original	26.59	—	10.24	—	36.83	—	0.408	—
Opt1	26.48	-0.414%	8.63	-15.72%	35.11	-4.670%	0.504	23.53%
Opt2	26.53	-0.226%	9.06	-11.52%	35.59	-3.367%	0.438	7.353%
Opt3	26.54	-0.188%	9.51	-7.129%	36.05	-2.118%	0.352	-13.73%
Opt4	26.65	0.226%	10.56	3.125%	37.21	1.032%	0.296	-27.45%
Opt5	26.71	0.451%	11.67	13.96%	38.38	4.209%	0.268	-34.31%

③优化方案型线

图 4-40 给出了 opt1、opt3、opt5 三个最优方案与原始方案的型线对比：opt1 型线在靠基线区域明显内缩且有“上抬”趋势，而靠水线区域有“下垂”之势，使得排水体积往上集中；opt5 型线在基线附近则向外扩张，尤其是中间站位有明显的“下塌”，靠尾部型线仍向内缩；opt3 型线整体均向内缩，但中间站位亦有“下塌”趋势，且型线“走势”与 opt5 有些相似。



160043:2

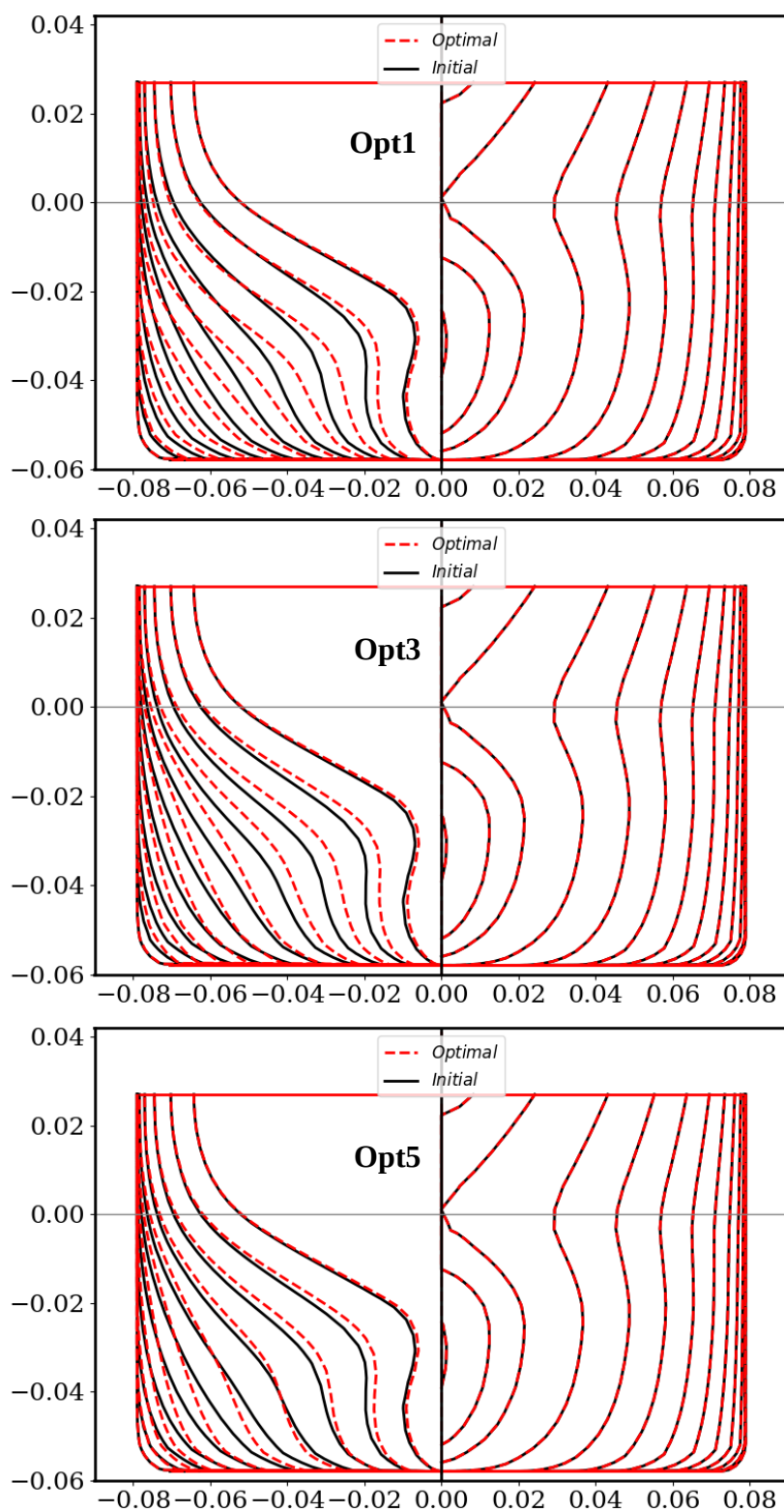


图 4-40 优化方案与原始方案型线对比

Fig.4-40 Comparison of hull form lines between original and optimal design



160043:2

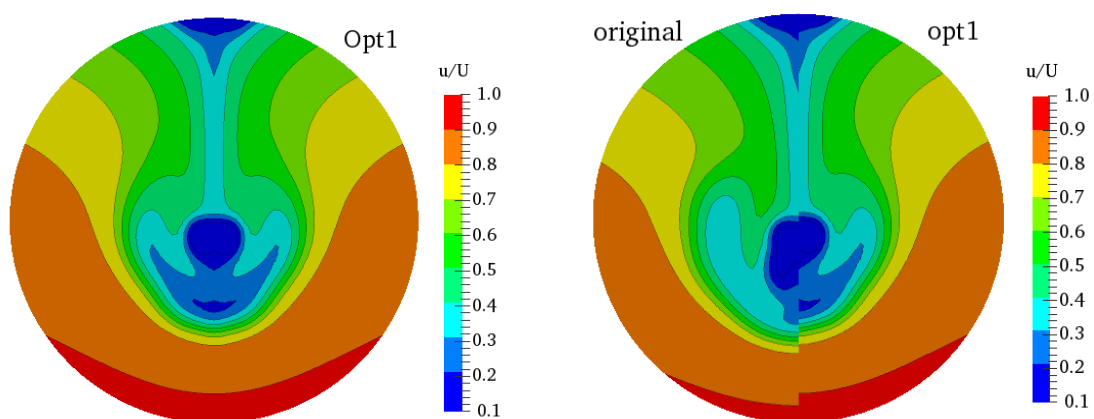


图 4-41 Opt1 桨盘面的无因次轴向速度云图与原始方案对比
Fig.4-41 Contour of u/U at propeller disk of opt1 design & comparison with original design

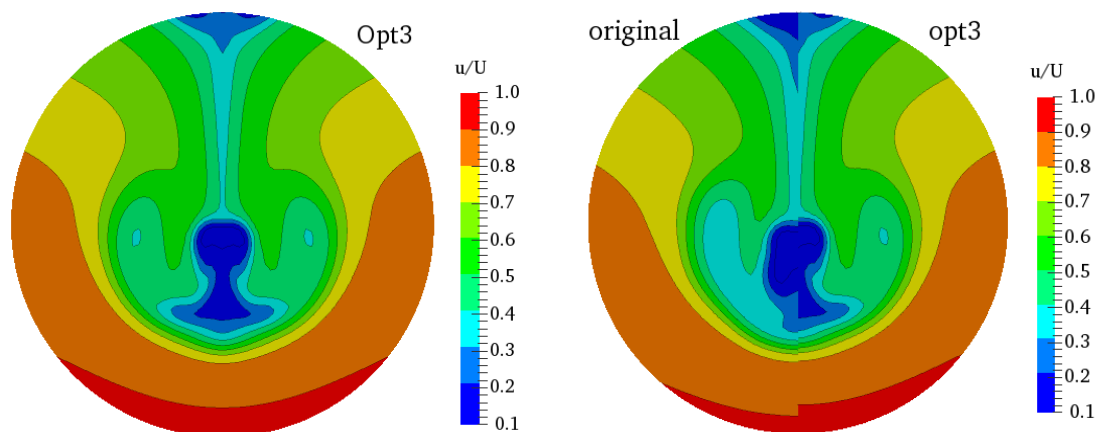


图 4-42 Opt3 桨盘面的无因次轴向速度云图与原始方案对比
Fig.4-42 Contour of u/U at propeller disk of opt3 design & comparison with original design

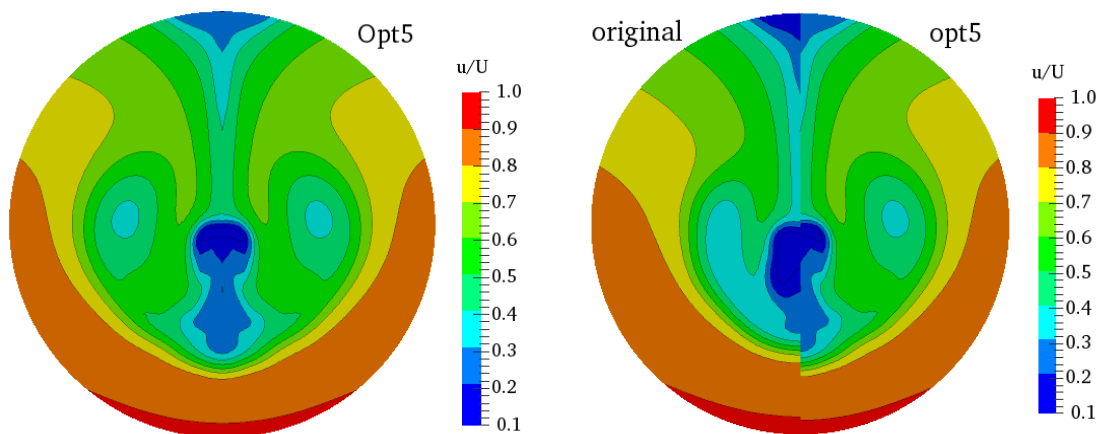


图 4-43 Opt5 桨盘面的无因次轴向速度云图与原始方案对比
Fig.4-43 Contour of u/U at propeller disk of opt5 design & comparison with original design



④优化方案桨盘面伴流品质分析

图 4-41, 4-42, 4-43 给出了 opt1、opt3、opt5 桨盘面无因次轴向速度云图及与原始方案对比, opt1 方案与单目标优化的最优方案相近。

图 4-44 给出了 opt1、opt3、opt5 和原始方案的桨盘面不同半径处无因次轴向速度均值对比, 从图中可以看出: opt1 的桨盘面无因次轴向速度均值在 $r/R = 0.7 \sim 1.2$ 明显大于原始方案, 但在 $r/R = 0.3 \sim 0.6$ 反而小于原始方案, 桨盘面无因次轴向速度的径向“波动”比原始方案大; opt5 的桨盘面无因次轴向速度的径向“波动”最小, 其无因次轴向速度均值在 $r/R = 0.3 \sim 0.8$ 时明显大于原始方案, 但在 $r/R = 1.0 \sim 1.2$ 时明显小于原始方案; opt3 的桨盘面无因次轴向速度均值在各个半径处均大于原始方案, 在 $r/R = 0.3 \sim 0.8$ 时明显大于原始方案, 在 $r/R = 0.9 \sim 1.2$ 时也略大于原始方案, 且桨盘面无因次轴向速度的径向“波动”也比原始方案小, 伴流径向分布更为均匀。

图 4-45, 4-46 给出了 opt1、opt3、opt5 和原始方案的桨盘面不同半径处 ($r/R = 0.3 \sim 1.2$) 无因次轴向速度周向分布, 从图中可以看出: 在 $r/R = 0.3 \sim 0.5$ 时, opt1、opt3、opt5 的桨盘面无因次轴向速度的周向“波动”均比原始方案小; 在 $r/R = 0.7 \sim 1.2$ 时, opt1 的桨盘面无因次轴向速度的周向“波动”比原始方案大, 而 opt3 和 opt5 的周向“波动”减小, 伴流周向分布更均匀。

综上, opt1 的伴流分布最不均匀, opt5 的伴流分布最为均匀但外半径处伴流减小, opt3 各半径处伴流均增大且径向、周向分布都比原始方案更为均匀。

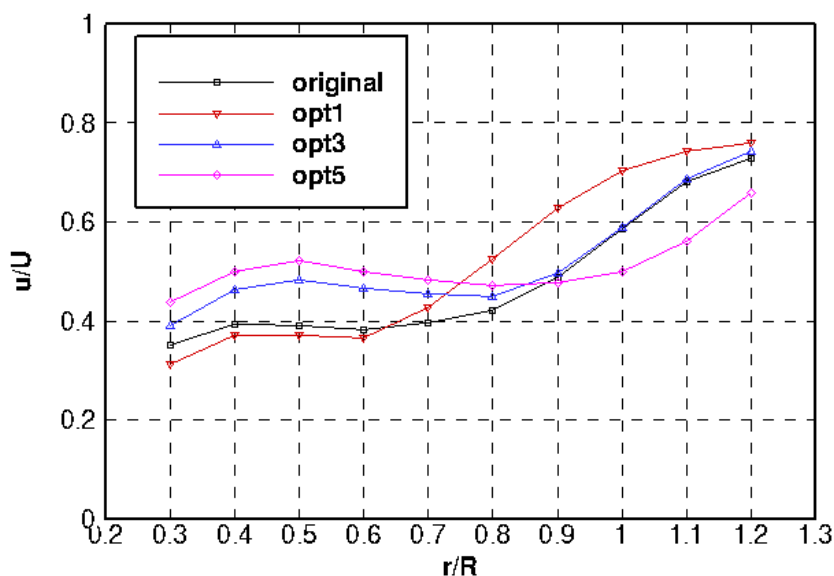


图 4-44 优与原始方案桨盘面不同半径处无因次轴向速度均值对比

Fig.4-44 Comparison of mean u/U at various radius between original and optimal design

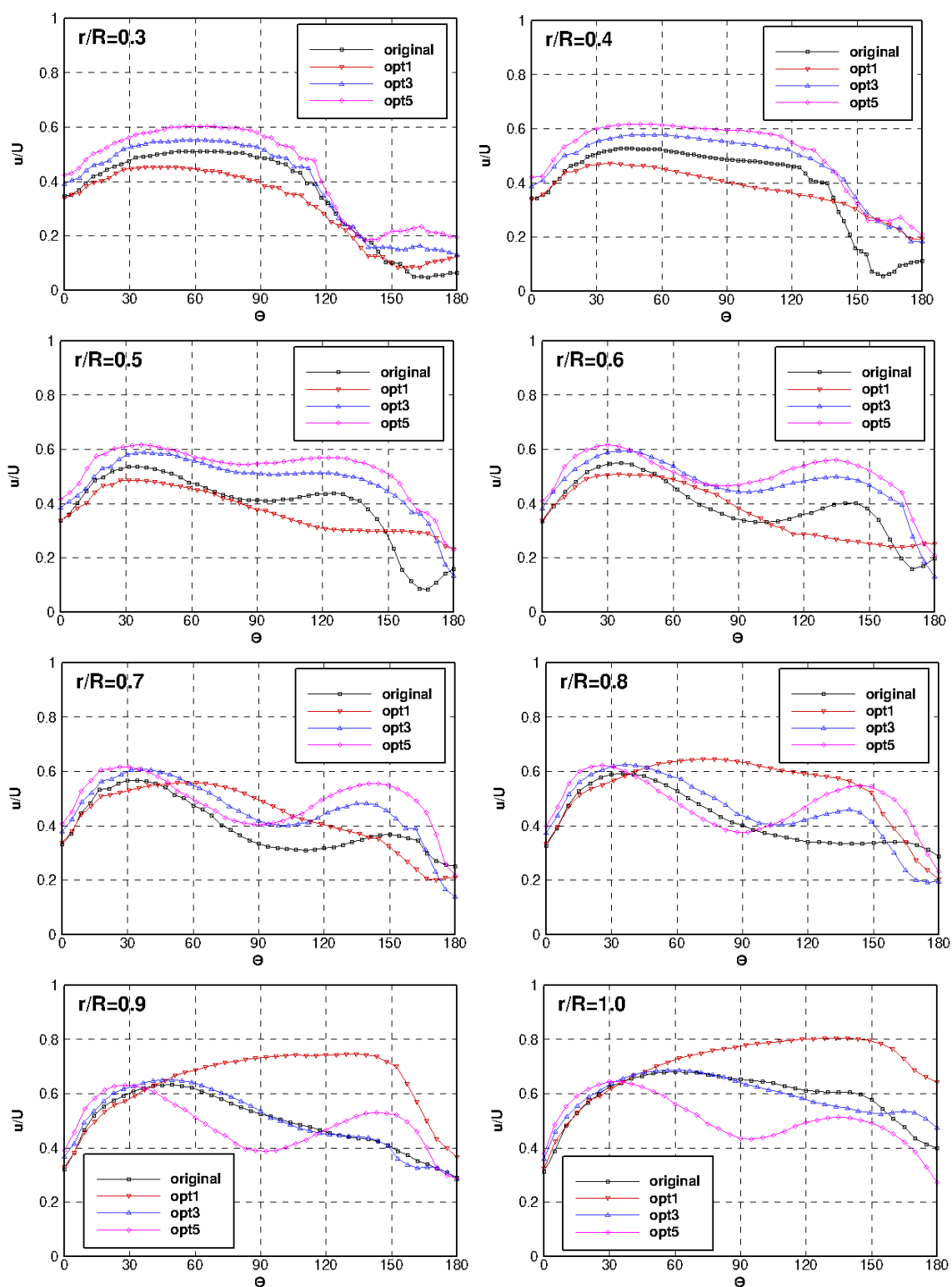
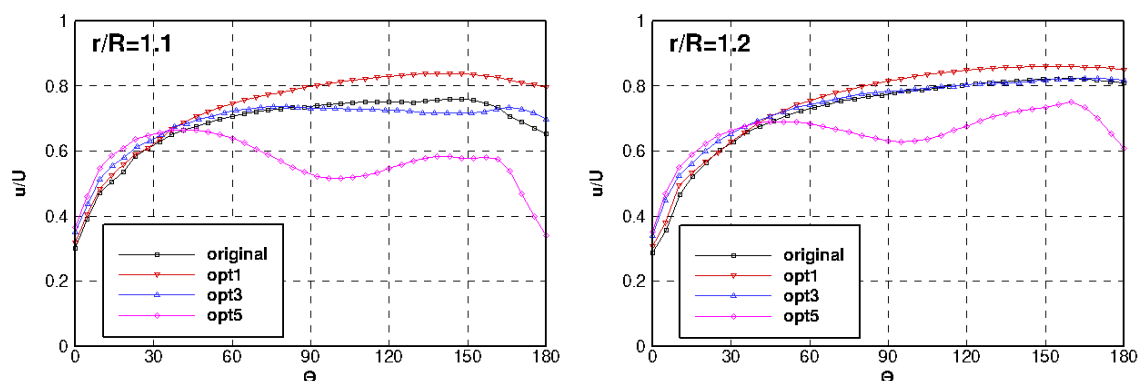


图 4-45 优化方案与原始方案桨盘面无因次轴向速度对比 ($r/R = 0.3 \sim 1.0$)
Fig.4-45 Comparison of u/U at propeller disk between original and optimal design ($r/R = 0.3 \sim 1.0$)

图 4-46 优化方案与原始方案桨盘面无因次轴向速度对比 ($r/R = 1.0 \sim 1.2$)Fig.4-46 Comparison of u/U at propeller disk between original and optimal design ($r/R = 1.0 \sim 1.2$)

4.6 本章小结

本章以典型低速肥大船 JBC 为优化对象, 分别对 JBC 进行了艏部线型优化和艉部线型优化, 在艉部线型优化中, 又分别进行了单目标优化和多目标优化, 经过一系列验证和分析得出以下结论:

(1) 在艏部线型优化中, 采用平移法和 FFD 方法对艏部进行几何重构, 采用 RANS 方法对总阻力进行评估, 以总阻力为目标, 采用遗传算法求解。从优化结果来看, 最优方案总阻力降幅很小, 仅减小 0.5%, 结合流场分析其原因为: 低速肥大船本身兴波较小, 而且球鼻艏过于肥大, 在约束条件下很难产生明显的有利兴波干扰; JBC 艏部型线变化平缓, 而艉部型线收缩剧烈, 通过原始船型的涡量等势面图发现艉部存在明显的流动分离现象, 然而 JBC 艏部较丰满, 在约束条件下的变型难以缓解艉部的流动分离。

(2) 在艉部线型优化中, 采用 FFD 方法进行几何重构, 使用叠模方法评估阻力。在单目标优化中, 通过比较叠模方法和计及自由面的计算结果验证了叠模方法的可靠性; 而且在多目标优化中, 叠模方法和计及自由面计算得到的 Pareto 前沿的形状基本一致, 目标函数值基本相等, 进一步验证了叠模方法的可靠性。

(3) 在艉部阻力单目标优化中, 最优船型计及自由面时总阻力至少下降 4.73%, 其中压阻力下降 15.93%。结合流场分析: 优化方案的自由面兴波变化很小, 压阻力的大幅下降主要来自于粘压阻力成分; 优化方案艉部低压区明显减小, 而且纵向压力梯度减小, 这样可以减少因纵向压力梯度和粘性对水流动能的耗散; 原始方案在艉部因流动分离产生了明显的低速区, 而优化方案的低速区减小, 说明流动分离得到改善; 涡量对比更加直观地展示了优化方案艉部涡流大幅减少, 艉部泻涡得到明显改善, 使得粘压阻力大幅降低。



(4) 对艏部阻力单目标优化的最优方案桨盘面伴流品质进行分析得：优化方案无因次轴向速度均值在外半径处 ($r/R = 0.7 \sim 1.2$) 明显大于原始方案，但内半径处 ($r/R = 0.3 \sim 0.6$) 反而略小于原始方案，桨盘面无因次轴向速度的径向“波动”变大；优化方案在 $r/R = 0.3 \sim 0.6$ 时的无因次轴向速度的周向“波动”比原始方案小，在 $r/R = 0.7 \sim 1.2$ 时的无因次轴向速度的周向“波动”比原始方案大。

(5) 在艏部阻力和伴流的多目标优化中，得到的 Pareto 前沿呈现“凸形”，对其中三个较典型的优化船型进行比较得：opt1 总阻力降幅最大 4.67%，其中压阻力减小 15.72%，但桨盘面伴流不均匀度增大 23.53%，伴流品质降低；opt5 伴流不均匀度降低 34.31%，但总阻力增大 4.209%；opt3 总阻力和桨盘面伴流不均匀度均有减小，总阻力降低 2.118%，其中压阻力降低 7.129%，伴流不均匀度减小 13.73%，各半径处伴流均增大且径向、周向分布都比原始方案更为均匀，在总阻力减小的基础下推进性能也将大幅提升，综合节能效果更好。



第五章 多体船线型优化

5.1 引言

多体船一般航速较高，兴波阻力占比很大。与单体船不同之处在于，多体船存在片体布局的问题，片体间的兴波干扰对兴波阻力有很大影响，因此在多体船线型优化中，不仅要考虑单个片体的几何重构，更需要考虑片体间距的重构。由于片体型线和片体间距的变化对多体船兴波阻力的耦合影响十分复杂，变化规律更为难寻，因此更能体现出船型优化的优势。因此，本章将对某高速错列四体船进行线型优化。

5.2 优化对象描述

本章优化的船型为由四个相同片体构成的某错列四体船（图 5-1），片体主要船型参数及片体间距见表 5-1。

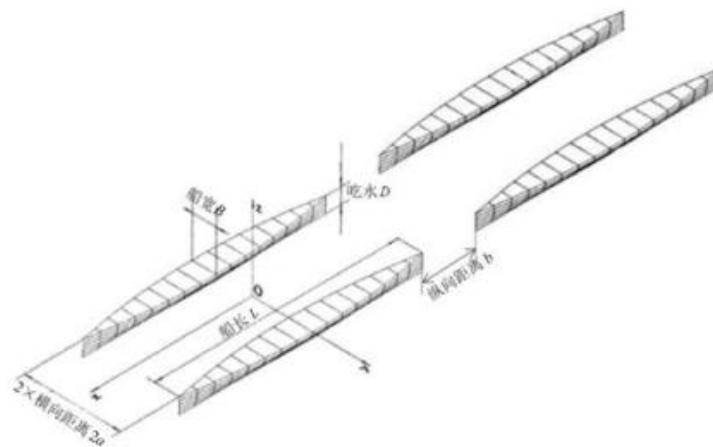


图 5-1 错列四体船示意图
Fig.5-1 Quad-hull ship sketch

表 5-1 错列四体船主尺度要素表
Table 5-1 Data of quad-hull ship

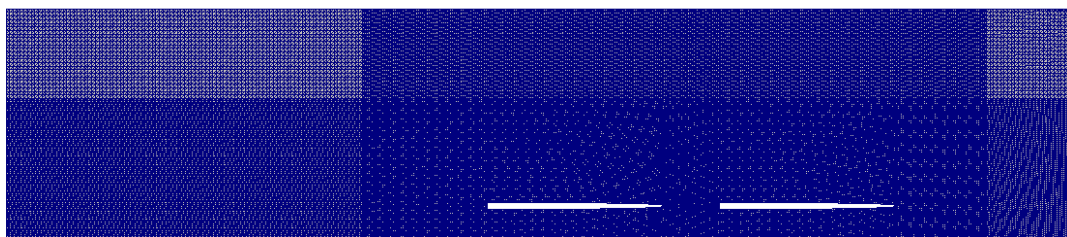
项目	符号	单位	大小
水线长	L_{WL}	m	53.73
型宽	B	m	2.00
吃水	T	m	3.80

表 5-1 错列四体船主尺度要素表（续表）
Table 5-1 Data of quad-hull ship (continued)

项目	符号	单位	大小
无因次横向半间距	a	m	0.2
无因次纵向间距	b	m	0.2
排水体积	∇	m^3	71.5
湿表面积	S_{wet}	m^2	242

5.3 计算域网格划分

第三章已经验证了 NM 数值方法用于中高速船阻力性能优化的可靠性和高效性，因此本章采用 NM 数值方法对错列四体船的兴波阻力进行评估。每个片体水下部分船体表面采用大约 27000 个三角形单元进行离散，首尾部网格进行适当加密。自由面计算域大小为 $-5 L_{\text{pp}} < X < 1.5 L_{\text{pp}}$ ， $0 < Y < 1.5 L_{\text{pp}}$ ，采用半域计算，船体附近一定范围内进行适当加密，自由面计算域网格划分如图 5-2 所示。

图 5-2 自由面计算域网格划分
Fig.5-2 Free surface grid

5.4 单航速优化

5.4.1 优化问题的定义

（1）目标函数

以 $Fr = 0.4$ 的兴波阻力最小作为优化目标，目标函数如下：

$$F = R_w / R_{w0} \quad (5.1)$$

式中， R_w 为重构船型的兴波阻力， R_{w0} 为母型船兴波阻力。

（2）几何重构方法及设计变量选取

采用 FFD 方法对片体进行几何重构，选取 1 个 Lattice。由于该错列四体船吃水极浅，因此仅选取一前一后两组沿船宽方向移动的控制点，共两个设计变量 $Y1$ 、



Y2。Lattice 范围大小及移动控制点如图 5-3 所示，片体型线变化如图 5-4 所示。

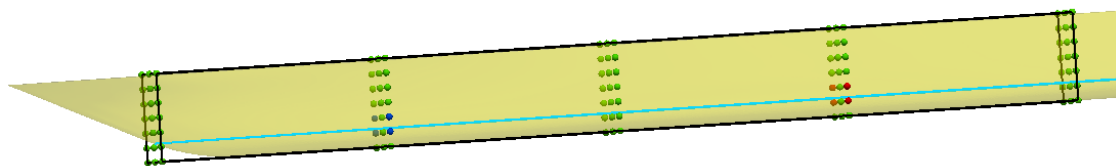


图 5-3 Lattice 范围大小及控制点分布
Fig.5-3 Lattice and control points

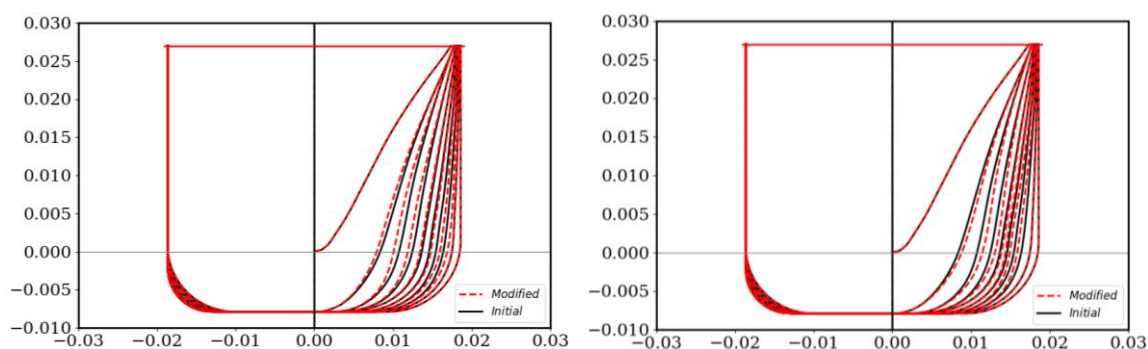


图 5-4 片体几何重构 (FFD 方法)
Fig.5-4 Demihull deformation (FFD)

除了片体的几何重构，还需要对错列四体船的片体间距进行重构，因此另选取两个设计变量 a （无因次横向半间距）、 b （无因次纵向间距）。各个设计变量的取值范围详见表 5-2。

（3）约束条件

本次错列四体船线型优化保证片体主尺度 L_{pp} 、 B 、 T 固定不变，总排水量变化不超过 $\pm 0.3\%$ ，总湿表面积变化不超过 $\pm 0.3\%$ ，且片体间横纵向间距均约束在一定范围内。

（4）优化策略

本次优化通过优化拉丁方试验设计方法在设计变量范围内均匀选取 40 个样本点（部分设计变量之间的均匀性正交性分布见图 5-5），并构建 Kriging 近似模型，采用遗传算法求解最优船型，遗传算法参数见表 5-2。

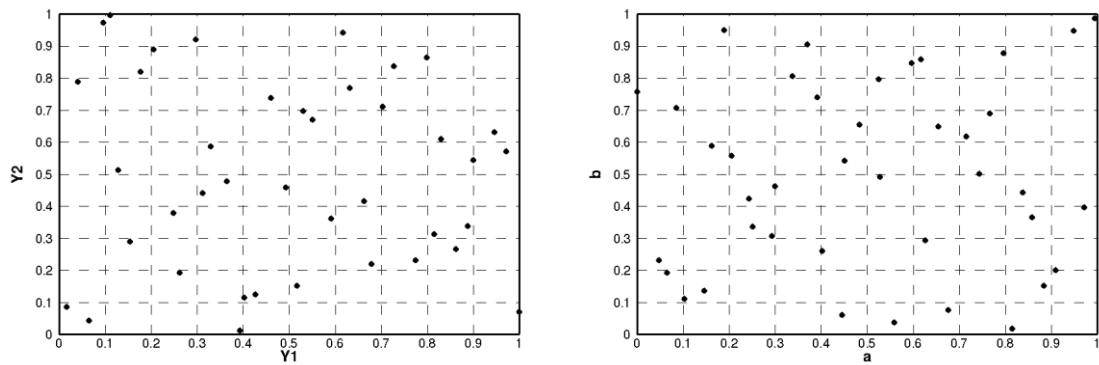


图 5-5 OLHD 试验设计部分设计变量之间的均匀性正交性分布
Fig.5-5 OLHD experimental design

表 5-2 错列四体船线型优化问题的定义
Table 5-2 Definition of the optimization problem

项目	定义	备注
目标函数	$F = R_w / R_{w0}$	$Fr = 0.4$
设计变量		
Y1	$[-0.003, 0.003]$	红色控制点 y 向移动量
Y2	$[-0.004, 0.004]$	蓝色控制点 y 向移动量
a	$[0.05, 0.25]$	无因次横向半间距
b	$[0.1, 0.3]$	无因次纵向间距
∇ 、 S_{wet}	变化不超过 $\pm 0.3\%$	
优化策略		
种群大小	40	
最大迭代次数	100	

5.4.2 优化结果及分析

(1) 优化结果

数值计算在一个 PC 上运行完成, 整个优化共用时 10 个小时。在迭代到第 100 次时, 各个设计变量已经基本上收敛, 目标函数已达到了最小值。目标函数及其各个设计变量的在优化过程中的收敛过程如图 5-6 所示, 最优方案所对应的目标函数、设计变量收敛值见表 5-3。

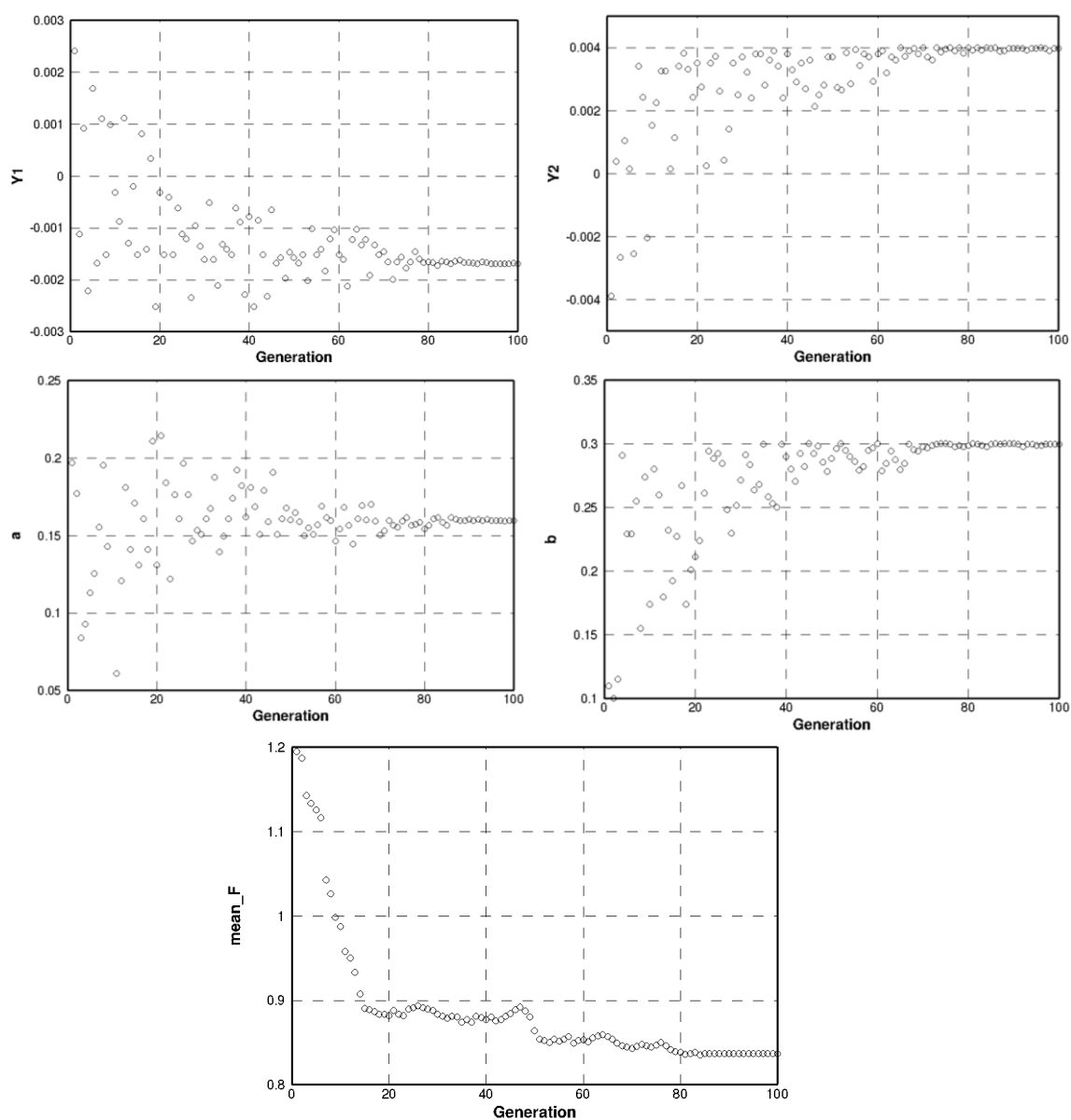


图 5-6 目标函数及设计变量收敛过程
Fig.5-6 Convergence of objective function and design variables

表 5-3 最优方案
Table 5-3 Optimal solution

Y1	Y2	a	b	F	∇	S_{wet}
-0.0017	0.0040	0.1595	0.3000	0.8368	0.109%	0.222%

优化结果表明, 最优方案兴波阻力减小 16.32%, 排水体积增大 0.109%, 湿表面积增加 0.222%, 兴波阻力降幅明显, 且排水体积和湿表面积变化均在约束范围



内。最优方案与原始方案片体型线及片体布局对比如图 5-7, 5-8 所示, 从型线对比可以看出, 优化方案艏部型线内缩, 靠平行中体型线略微外扩, 水线进流角减小; 从片体布局对比可以看出, 片体的横向间距缩小, 纵向间距增大。

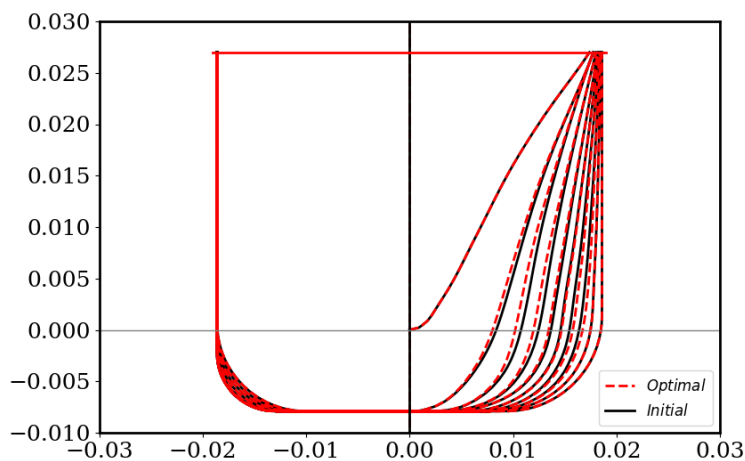


图 5-7 优化方案与原始方案片体型线对比

Fig.5-7 Comparison of demihull form lines between original and optimal design



图 5-8 优化方案（红色）与原始方案（黄色）片体布局对比

Fig.5-8 Comparison of demihull layout between original (yellow) and optimal (red) design

(2) 优化结果验证与分析

采用 NM 数值方法对优化方案进行评估, 兴波阻力对比结果见表 5-4, 其中兴波阻力减小 14.58%, 与最优目标函数值相近, 说明近似模型是可靠的。

图 5-9 给出了原始方案和优化方案的波形对比, 图 5-10 分别给出了错列四体船中心对称面 ($Y/L_{pp} = 0$)、片体内侧及外侧 (距离片体 $s/L_{pp} = 0.02$) 波切对比, 从图中可以看出优化方案 hull1 艏部内侧兴波略微增大, 但 hull2 内外侧兴波均明显减小, 说明优化方案片体间产生了有利的兴波干扰, 使得兴波阻力大幅下降。



表 5-4 优化方案与原始方案兴波阻力对比
Table 5-4 Comparison of wave resistance between original and optimal design

	原始方案	优化方案	变化
R_w (N)	5524.02	4718.63	-14.58%

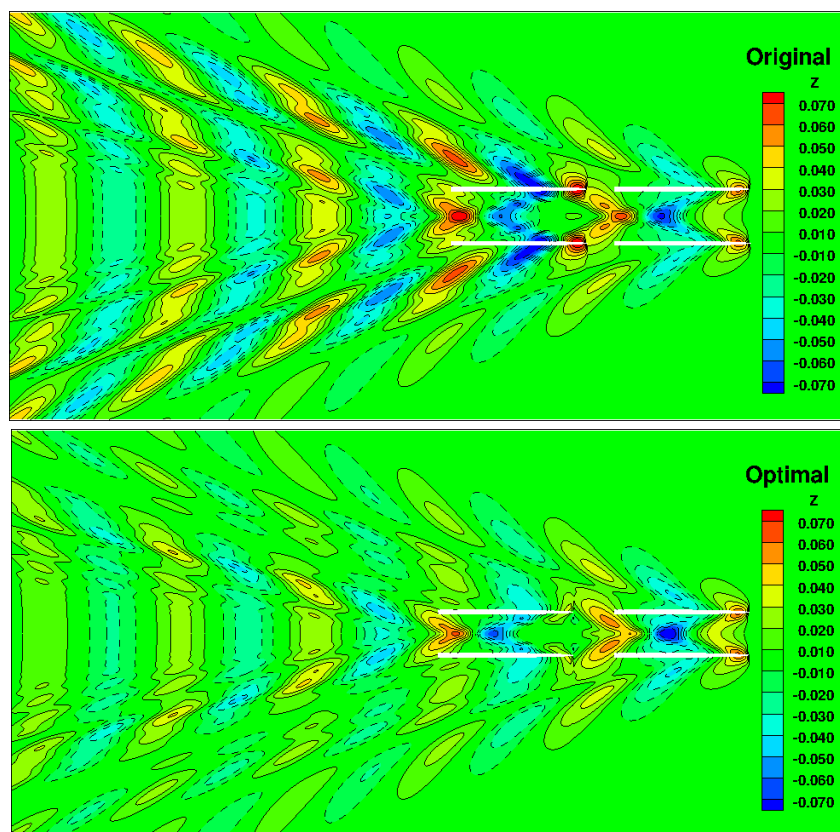
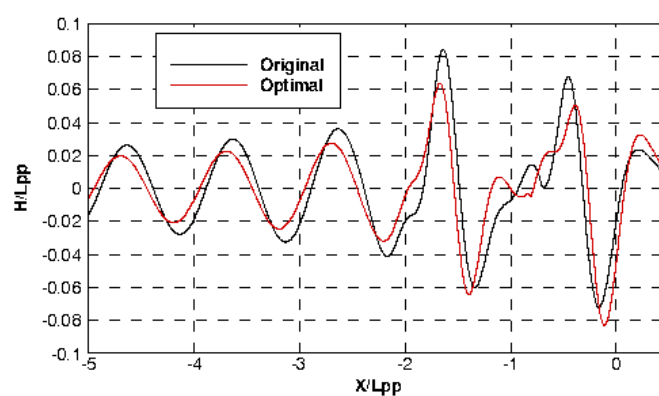
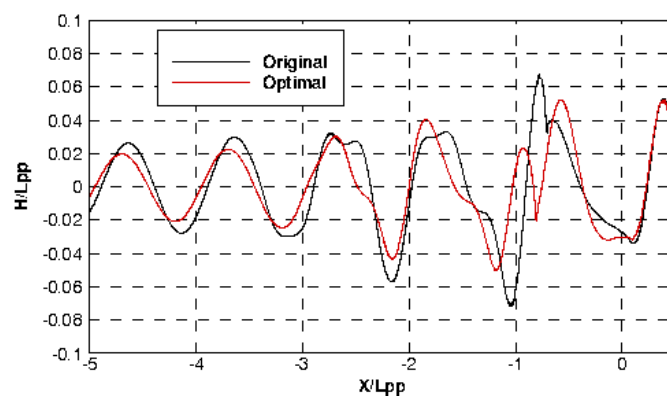


图 5-9 优化方案与原始方案兴波对比
Fig.5-9 Comparison of wave pattern between original and optimal design

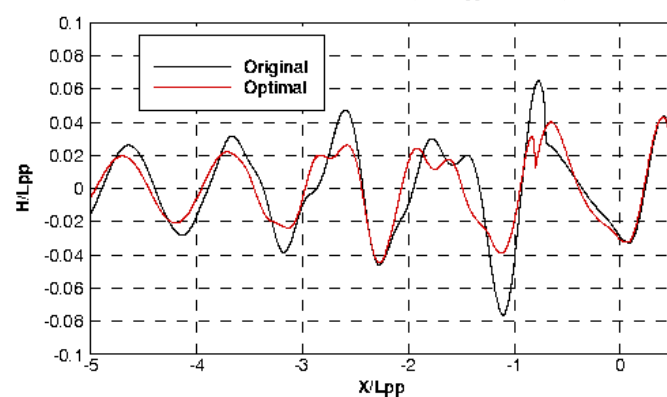


a) 中心对称面 ($Y / L_{pp} = 0$)
a) Mid symmetry ($Y / L_{pp} = 0$)



b) 片体内侧 ($s / L_{pp} = 0.02$)

b) Inside demihull ($s / L_{pp} = 0.02$)



c) 片体外侧 ($s / L_{pp} = 0.02$)

c) Outside demihull ($s / L_{pp} = 0.02$)

图 5-10 优化方案与原始方案波切对比 (船首位于 $X / L_{pp} = 0.5$ 处)

Fig.5-10 Comparison of wave cut between original and optimal design

采用 RANS 方法对优化效果进行验证, 兴波对比如图 5-11 所示, 从图中可以看出, 优化方案兴波明显减小, 优化效果明显。

5.5 多航速优化

5.5.1 优化问题的定义

多目标优化的目标函数如下:

$$\begin{cases} F_1 = R_w / R_{w0}, Fr = 0.4 \\ F_2 = R_w / R_{w0}, Fr = 0.5 \end{cases} \quad (5.2)$$

采用多目标遗传算法 NSGA-II 求解最优船型, 种群个体数为 200, 交叉率 0.8, 变异率 0.2, 最大迭代次数 200。

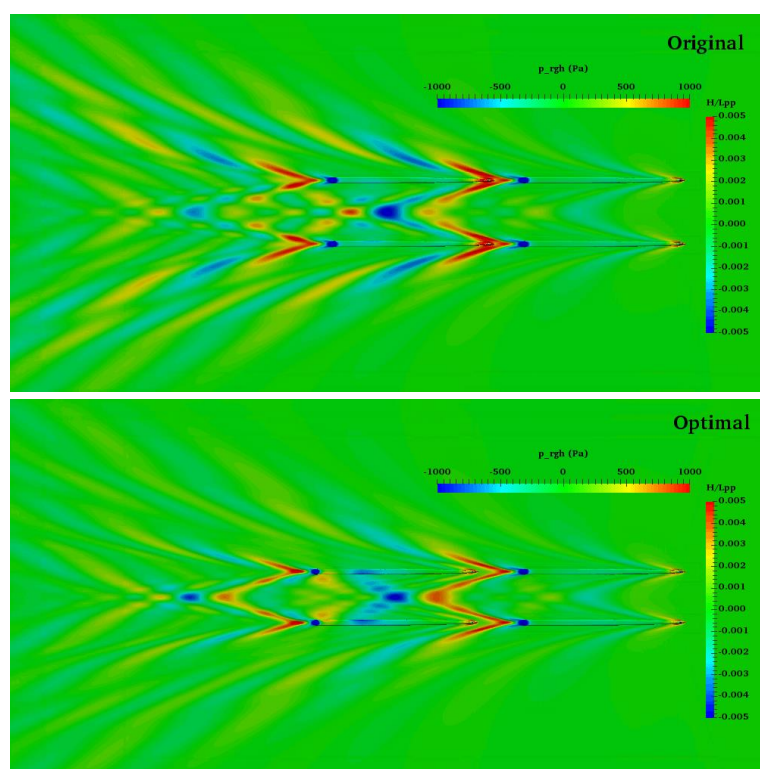


图 5-11 优化方案与原始方案兴波对比
Fig.5-11 Comparison of wave pattern between original and optimal design

5.5.2 优化结果及分析

经过 120 次迭代后基本达到收敛，图 5-12 给出了目标函数 F1 和 F2 的 Pareto 前沿，可以看出 Pareto 前沿上个体分布均匀，种群的多样性良好。Pareto 前沿形状为“凸形”，说明两个目标函数是相互矛盾的关系：低航速兴波阻力减小，高航速兴波阻力相对增大；反之，高航速兴波阻力减小，则低航速兴波阻力相对增大。

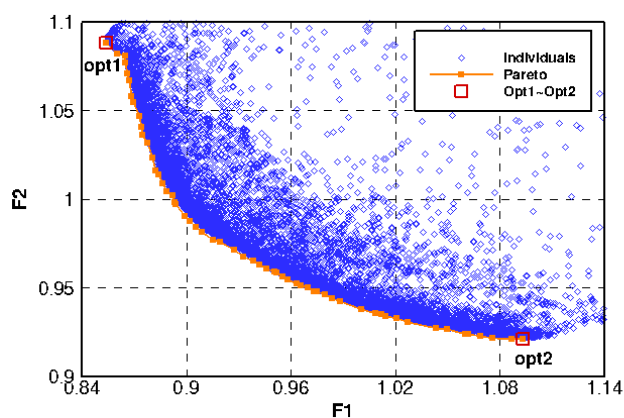


图 5-12 目标函数 F1 和 F2 的 Pareto 前沿
Fig.5-12 Pareto optimal solution set



表 5-5 优化方案与原始方案兴波阻力对比
Table 5-5 Comparison of wave resistance between original and optimal design

	R_{w1} (N)		R_{w2} (N)	
Original	5525.02		6409.37	
Opt1	4719.48	-14.58%	7030.02	9.68%
Opt2	5996.20	8.53%	5940.00	-7.32%

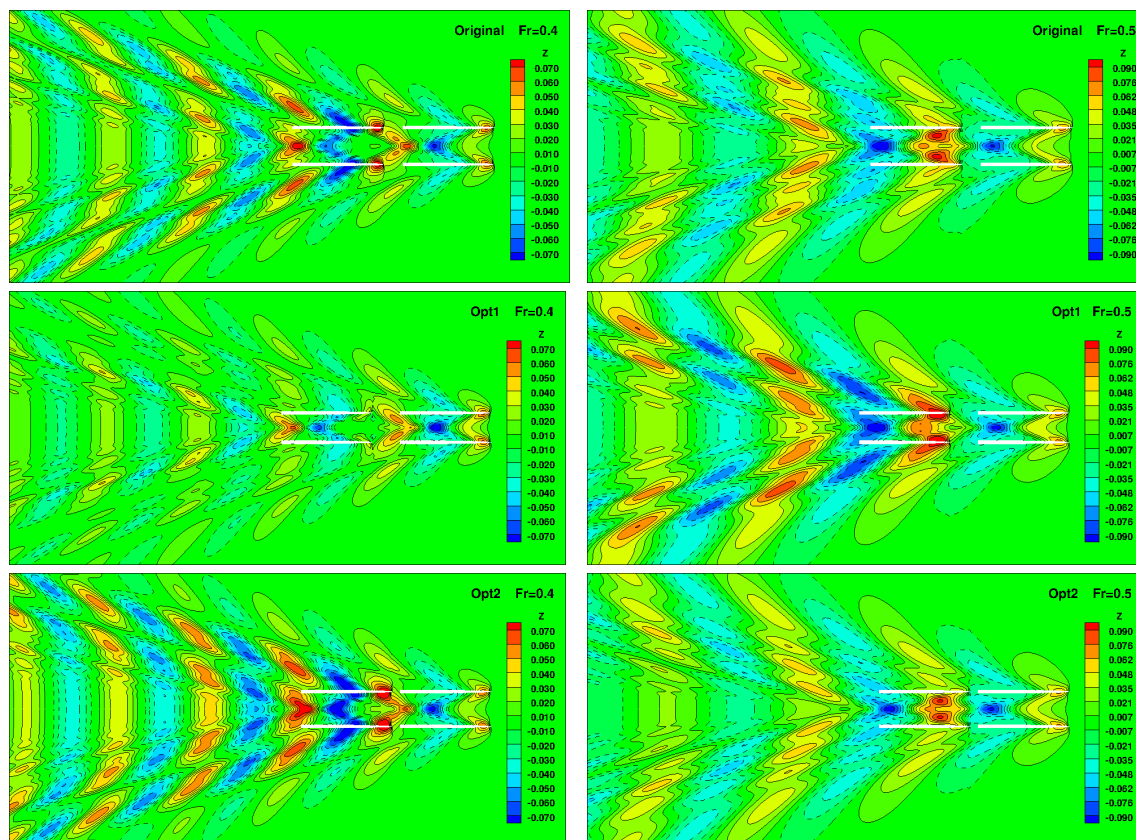


图 5-13 两个航速下优化方案与原始方案兴波对比
Fig.5-13 Comparison of wave pattern between original and optimal design at two different speed

在 Pareto 前沿中取出两端处的优化方案 opt1 和 opt2 进行评估, 从表 5-5 和图 5-13 中可以看出, opt1 在 $Fr = 0.4$ 时兴波明显减小, 在 $Fr = 0.5$ 时兴波反而增大, 而 opt2 则恰好相反, 说明 opt1 适合低航速, opt2 适合高航速, 与 Pareto 结果吻合。

5.6 本章小结

本章以某高速错列四体船为优化对象, 采用 FFD 方法对片体艏部进行几何重构, 同时对片体间横向、纵向间距进行几何重构, 分别进行了单航速单目标优化和多航速多目标优化, 经过数值计算验证和分析得出以下结论:



(1) 单目标优化的最优方案和原始方案的波形及波切对比表明 hull1 艏部内侧兴波略微增大，但 hull2 内外侧兴波均明显减小，说明优化方案片体间产生了有利的兴波干扰，使得兴波阻力大幅下降。

(2) 多目标优化的 Pareto 前沿形状为“凸形”，优化方案 opt1 和 opt2 的计算结果表明，opt1 在 $Fr = 0.4$ 时兴波明显减小，在 $Fr = 0.5$ 时兴波反而增大，而 opt2 则恰好相反，说明 opt1 适合低航速，opt2 适合高航速，与 Pareto 结果吻合。



16004312



第六章 结论与展望

6.1 结论

本论文在课题组已初步建立的船体线型优化软件 OPTShip-SJTU 的基础上, 对部分模块和方法进行完善和验证, 并先后对中高速船、低速肥大船以及多体船进行了线型优化, 对不同类型船舶的线型优化问题进行了探究, 针对不同的船型尝试了不同的线型优化区域, 采用了不同的几何重构方式, 使用了不同的数值方法评估船舶性能, 并对不同类型船舶较关注的性能进行了单目标或多目标优化, 为各类实际船舶的线型优化问题提供了一定的指导和借鉴。本文主要结论如下:

(1) 本文以典型中高速船 KCS 标模为优化对象, 对 KCS 前体进行线型优化并得出结论:

①分析验证了 Kriging 近似模型的可靠性, 以及 NM 数值方法用于中高速船阻力性能优化的可靠性和高效性。

②最优船型总阻力降幅明显, 结合流场分析存在“峰谷”交错叠加的现象, 从而产生有利兴波干扰。

(2) 本文以典型低速肥大船 JBC 标模为优化对象, 分别进行了艏部和艉部线型优化, 并得出结论:

①艏部优化效果并不明显, 原因是低速肥大船本身兴波较小, 而且球鼻艏过于肥大, 在约束条件下很难产生明显的有利兴波干扰。

②艉部单目标和多目标优化结果均验证了叠模方法的可靠性, 有效缩短了计算时长和优化周期。

③阻力单目标最优船型艉部的流动分离得到明显改善, 从而大幅降低粘压阻力。对其桨盘面伴流分布的分析发现在内半径处桨盘面无因次轴向速度反而减小, 而且径向“波动”和周向“波动”均变大, 说明伴流品质反而变差。

④阻力和伴流的多目标优化结果表明, 其 Pareto 前沿呈现“凸形”, 两个性能之间存在一定的矛盾。其中一个优化船型不仅总阻力减小, 而且桨盘面各半径处的伴流均增大, 径向、周向分布都比原始方案更为均匀, 阻力和伴流均有明显改善, 综合节能效果更好。

(3) 本文对某高速错列四体船的片体线型以及片体间横向、纵向间距同时进行了优化。单目标优化结果表明最优船型片体间产生了有利的兴波干扰, 使得兴



波阻力大幅下降；多目标优化的 Pareto 前沿形状为“凸形”，优化方案 opt1 和 opt2 的计算结果表明，opt1 在 $Fr = 0.4$ 时兴波明显减小，在 $Fr = 0.5$ 时兴波反而增大，而 opt2 则恰好相反，说明 opt1 适合低航速，opt2 适合高航速，与 Pareto 结果吻合。

6.2 研究展望

本文对不同类型船舶的线型优化问题探究表明，OPTShip-SJTU 具有良好的适用性和可靠性，并且为各类实际船舶的线型优化问题提供了一定的指导和借鉴。由于时间有限以及一些客观条件的制约，本文的工作仍存在一定的局限性：未能开展模型试验验证，还未全面开展更加复杂的性能优化，优化软件仍需要进一步的发展完善等。针对这些问题，可以在今后开展进一步的研究工作：

（1）结合模型试验，对目前已取得的优秀成果进行试验验证；对更多实际船型进行优化，进一步拓展和完善优化软件的功能和实用性，使其能尽快应用于工程实际应用中。

（2）进一步开展优化策略以及近似技术研究，尤其是将低精度求解器与高精度求解器结合使用的变精度模型（Variable Fidelity Model, VFM），结合高效的优化策略，达成“精度”与“效率”的有效平衡，为开展更加复杂的综合水动力性能优化打下坚实基础。

（3）进一步开展更加复杂的综合水动力性能优化，除考虑阻力和推进性能外，兼顾耐波性、操纵性等，并结合有效的多目标决策分析技术，最终实现船舶综合水动力性能的优化。

（4）船体型线设计在实际工程应用中会涉及到多个学科，除了水动力学外，还会涉及到结构力学、振动学、声学等，各个学科之间存在着复杂的耦合效应，基于系统工程思想、充分考虑学科之间耦合作用，并寻求系统总体性能最优的多学科优化（Multi Discipline Optimization, MDO）技术必将成为重要发展趋势。



参 考 文 献

- [1] MEPC 63/23. Annex 8. Resolution MEPC[R]. MEPC, 2012, 212(63).
- [2] Campana E F, Peri D, Tahara Y, Kandasamy M, Stern F. Numerical Optimization Methods for Ship Hydrodynamic Design[C]. SNAME Annual Meeting, 2009.
- [3] 赵峰, 李胜忠, 杨磊, et al. 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.
- [4] Hou Y H. Hull form uncertainty optimization design for minimum EEOI with influence of different speed perturbation types[J]. Ocean Engineering, 2017, 140: 66-72.
- [5] Hino T, Kodama Y, Hirata N. Hydrodynamic shape optimization of ship hull forms using CFD[C]. Proceedings 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka Prefecture University and Osaka University, Japan, 1998.
- [6] Tahara Y, Himeno Y. An application of computational fluid dynamics to tanker hull form optimization problem[C]. Proceedings 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka Prefecture University and Osaka University, Japan, 1998.
- [7] Hino T. Shape optimization of practical ship hull forms using Navier-Stokes analysis[C]. Proceedings 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Nantes, France, 1999.
- [8] Janson C, Larsson L. A method for the optimization of ship hulls from a resistance point of view[C]. Proceedings 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, Norway, 1996.
- [9] Day A H, Doctors L J. The survival of the fittest-evolutionary tools for hydrodynamic design of ship hull form[J]. Trans. Royal Inst. Naval Architects, 2000:182-197.
- [10] Harries S. Parametric Design and Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms[D]. Institut für Schiffs-und Meerestechnik, Technische University, Berlin, Germany, 1998.
- [11] Huan J, Huang T T. Sensitivity Analysis Methods for Shape Optimization in Nonlinear Free Surface Flow[C]. Proceedings 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka Prefecture Univ. and Osaka Univ, Japan, 1998.



- [12] Yang C, Noblesse F, Lohner R. Practical hydrodynamic optimization of a trimaran[C]. SNAME Transactions, 2001.
- [13] Ragab S A. An adjoint formulation for shape optimization in free-surface potential flow[J]. Journal of Ship Research, 2001, 45(4): 269-278.
- [14] Saha G, Suzuk K and Kai H. Hydrodynamic optimization of ship hull forms in shallow water[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2004, 9: 51-62.
- [15] Saha G, Suzuki K, Kai H. Hydrodynamic optimization of a catamaran hull with large bow and stern bulbs installed on to center plane of the catamaran[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2005, 10: 32-40.
- [16] Harries S and Abt C. Formal hydrodynamic optimization of a fast mono-hull on the basis of parametric hull design[C]. In 5th International Conference on Fast Sea Transportation, Seattle. WA, 1999.
- [17] Chen P and Huang C. An inverse hull design approach in minimizing the ship wave[J]. Ocean Engineering, 2004, 31: 1683-1712.
- [18] Tahara Y, Patterson E, Stern F, Himeno Y. Flow and wave-field optimization of surface combatants using CFD-based optimization methods[C]. Proceedings 23rd ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, France, September, 2000.
- [19] 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.
- [20] Valorani M, Peri D, Campana E F. Efficient strategies to design optimal ship hulls[C]. AIAA 8th Multidisciplinary Analysis and Optimization Conf., 2000.
- [21] Campana E F, Peri D, Bulgarelli U P. Optimal Shape Design of a Surface Combatant with Reduced Wave Pattern[C]. Symposium on "Reduction of Military Vehicle Acquisition Time and Cost through Advanced Modelling and Virtual Simulation", Paris, France, 2002.
- [22] DEJONG K. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 1975.
- [23] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science, 1995.
- [24] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [25] Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[J]. Lecture notes in computer science, 2000, 1917: 849-858.
- [26] Peri D, Campana E F. Multidisciplinary design optimization of a naval surface



- combatant[J]. Journal of Ship Research, 2003, 47(1): 1-12.
- [27] Pinto A, Peri D, Campana E F. Multiobjective optimization of a container ship using deterministic particle swarm optimization[J]. Journal of Ship Research, 2007, 51(3): 217-228.
- [28] 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.
- [29] Valorani M, Peri D, Campana E F. Sensitivity analysis methods to design optimal ship hulls[J]. Optimization & Engineering, 2003, 4(4): 337-364.
- [30] Peri D, Pinto A, Campana E F. Multi-objective optimization of expensive objective functions with variable fidelity models[J]. Large-Scale Nonlinear Optimization, 2006, 83: 223-241.
- [31] Campana E F, Fasano G, Peri D, Pinto A. Particle swarm optimization: efficient globally convergent modifications[C]. European Conference on Computational Mechanics, Springer Netherlands, 5-8 June, 2006: 5-8.
- [32] Tahara Y, Peri D, Campana E F, Stern F. 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.
- [33] Harries S, Abt C, Heimann J, Hochkirch K. Advanced hydrodynamic design of container carriers for improved transport efficiency[C]. RINA Conference of Design & Operation of Container Ships, London, 2006.
- [34] Kim H J, Chun H H. Optimizing using Parametric Modification Functions and Global Optimization Methods[C]. 27th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea, 2008.
- [35] Peri D, Campana E F. Simulation Based Design of Fast Multihull Ship[C]. 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, 2006.
- [36] Tahara Y, Peri D, Campana E F, Stern F. Single and Multiobjective Design Optimization of a Fast Multihull Ship: numerical and experimental results[C]. 27th Symposium on Naval Hydrodynamics.
- [37] Kim H, Yang C, Löhner R, Noblesse F. A practical hydrodynamic optimization tool for the design of a monohull ship[C]. Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Anchorage, Vancouver, BC, Canada, 6-11 July, 2008: 98-107.
- [38] Kim H, Yang C, Chun H H. Hydrodynamic optimization of a modern container ship using variable fidelity models[C]. Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 21-26 June, 2009: 98-107.
- [39] Kim H, Yang C, Chun H H. A Combined Local and Global Hull Form



Modification Approach for Hydrodynamic Optimization[C]. 28th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2010.

[40] Peri D, Campana E F. Variable Fidelity and Surrogate Modeling in Simulation-Based Design[C]. 27th Symposium on Naval Hydrodynamics Seoul, Korea, 2008.

[41] Peri D. Self-Learning Metamodels for Optimization[J]. Journal Ship Research, 2009, 56(3): 94-108.

[42] Campana E F, Liuzzi G, Lucidi S, Peri D, Piccialli V, Pinto A. New global optimization methods for ship design problems[J]. Optimization & Engineering, 2009, 10(4): 533-555.

[43] Campana E F, Fasano G, Peri D, Pinto A. Nonlinear programming approaches in the multidisciplinary design optimization of a sailing yacht keel fin[J]. Pamm, 2010, 7(1): 1060601-1060602.

[44] 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.

[45] Diez M, Peri D, Fasano G, Campana E F. 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.

[46] Kim H, Yang C, Noblesse F. Hull form optimization for reduced resistance and improved seakeeping via practical designed-oriented CFD tools[C]. Conference on Grand Challenges in Modeling & Simulation, 2010: 375-385.

[47] 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.

[48] Tahara Y, Diez M, Volpi S, Chen X, Campana E F, Stern F. CFD-Based Multiobjective Stochastic Optimization of a Waterjet Propelled High Speed Ship[C]. 29th Symposium on Naval Hydrodynamics Gothenburg, Sweden, 26-31 August, 2012.

[49] 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.

[50] Diez M, Serani A, Campana E F. Multi-objective hydrodynamic optimization of the DTMB 5415 for resistance and seakeeping[C]. International Conference on FAST Sea Transportation, 2015.

[51] Diez M, Serani A, Campana E F, Stern F. Design space dimensionality reduction for single-and multi-disciplinary shape optimization[C]. Aiaa/issmo Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference(MA&O), Washington DC, USA, 13-17 June,



2016.

[52] Campana E F, Stern F, Diez M. Hydrodynamic ship design optimization considering uncertainty[C]. International Conference on Ships and Shipping Research, Nov, 2015.

[53] Campana E F, Diez M, Iemma U, Liuzzi G, Luicidi S, Rinaldi F, Serani A. Derivative-free global ship design optimization using global/local hybridization of the DIRECT algorithm[J]. Optimization & Engineering, 2016, 17(1): 127-156.

[54] Diez M, Serani A, Campana E F, et al. CFD-based stochastic optimization of a destroyer hull form for realistic ocean operations[C] International Conference on FAST Sea Transportation, 2017.

[55] Coppédé A, Vernengo G, Villa D. A combined approach based on Subdivision Surface and Free Form Deformation for smart ship hull form design and variation[J]. Ships & Offshore Structures, 2018(12): 1-10.

[56] Tahara Y, Ichinose Y, Kaneko A, et al. Variable decomposition approach applied to multi-objective optimization for minimum powering of commercial ships[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2018(1): 1-24.

[57] 卢晓平, 陈军. 穿浪双体船的船型优化[J]. 船舶工程, 2003, 25(1): 18-21.

[58] 卢晓平, 潘雨村. 高速三体船兴波阻力与片体布局优化研究[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(3): 347-354.

[59] 程成. 基于 iSIGHT 的螺旋桨优化系统的开发及运用研究[D]. 无锡, 中国船舶科学研究中心硕士论文, 2007.

[60] 叶茂盛. 最小阻力船型优化方法研究[D]. 大连理工大学, 2007.

[61] 张宝吉. 船体线型优化设计方法及最小阻力船型研究[D]. 大连理工大学, 2009.

[62] 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, 2010, 34(2).

[63] 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.

[64] 张宝吉. 基于混合优化算法的船体线型优化设计[J]. 上海交通大学学报 (自然版), 2012, 46(08): 1238-1242.

[65] 常海超, 李振, 冯佰威. 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.

[66] Feng B, Liu Z, Zhan C, Chang H, Cheng X. Ship hull automatic optimization techniques research based on CFD[C]. IEEE, International Conference on



Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, 2009: 663-667.

[67] 冯佰威, 刘祖源, 谢伟, 詹成胜. 船舶 CAD/CFD 集成优化接口开发及应用研究[J]. 船舶工程, 2009, 31(1): 116-119.

[68] 冯佰威, 刘祖源, 聂剑宁, 常海超, 程细得. 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.

[69] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 常海超. 船舶 CAD/CFD 一体化设计过程集成技术研究[C]. CAD/CAM 学术交流会议, 2009: 649-651.

[70] 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.

[71] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 常海超. 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.

[72] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 常海超. 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, 2010, 34(4): 649-651.

[73] 邱辽原, 谢伟, 姜治芳, et al. 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.

[74] 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.

[75] 倪其军, 李胜忠, 蒋昌师, et al. 大方形系数低速船尾部线型优化设计[C]. 船艇发展与水系旅游学术交流会, 2012.

[76] 李胜忠, 倪其军, 赵峰, et al. 大方形系数低速船尾部线型多目标优化设计[J]. 中国造船, 2013(3): 1-10.

[77] 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.

[78] 钱建魁, 毛筱菲, 王孝义, 恽秋琴. 基于 CFD 和响应面方法的最小阻力船型自动优化[J]. 船舶力学, 2012, 16(1-2): 36-43.

[79] 常海超, 程细得, 冯佰威, et al. 船型优化中样本点选取方法对近似模型精度的影响研究[J]. 中国造船, 2013(4): 84-93.

[80] 董素贞, 冯佰威, 詹成胜, 沈通, 常海超. 基于 CFD 近似模型的船尾线型多目标综合优化[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(4): 13-19.

[81] 刘晓义, 吴建威, 赵敏, et al. 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, 2015.



- [82] 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(上), 2015.
- [83] 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): 535-541.
- [84] Liu X, Zhao M, Wan D, Wu J. Hull Form Multi-Objective Optimization for a Container Ship with Neumann-Michell Theory and Approximation Model[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2017, 27(4): 423-432.
- [85] Wu J, Liu X, Zhao M, Wan D. Neumann-Michell theory-based multi-objective optimization of hull form for a naval surface combatant, Applied Ocean Research, 2017, 63: 129-141.
- [86] 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, 2016.
- [87] 缪爱琴, 刘鑫旺, 万德成. 基于 MOPSO 算法的船舶兴波阻力多目标船型优化[C]. 第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会文集, 2017.
- [88] Miao A, Wan D. CFD-Based Hull Form Optimization for Enhancement of Resistance and Seakeeping Performances[C]. Proceedings of the Twenty-seven (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, 2017.
- [89] Miao A, Wan D. Ship Hull Form Design Using a Kriging-based Global Optimization Algorithm[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods (ICCM2017), Guilin, Guangxi, China, 2017.
- [90] 上海交通大学. 基于水动力性能的船型优化设计软件 OPTShip-SJTU[CP]. 著作权登记号:2016SR094162.
- [91] 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, 上海交通大学硕士论文, 2017.
- [92] 刘晓义. 船体型线数值优化软件 OPTShip-SJTU 优化模块开发[D]. 上海, 上海交通大学硕士论文, 2017.
- [93] Sederberg T W, Parry S R, Free-Form Deformation of Solid Geometric Models[C]. Proceedings of the 13st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH, 1986.
- [94] 张萍, 朱德祥, 何术龙. 参数化的船型设计方法[J]. 中国造船, 2008, 49(4): 26-36.
- [95] Noblesse F, Huang F, Yang C. The Neumann-Michell theory of ship waves[J]. Eng.



Math, 2013, 79(1): 51–71.

[96] 上海交通大学. 基于 Neumann-Michell 理论船舶静水阻力求解器 NMSHIP-SJTU[CP]. 著作权登记号: 2015SR011407.

[97] Wu J, Zhang C and Wan D. Comparison of Two Methods for Forecasting the Drag, Sinkage and Trim Experienced by a Moving Ship[C]. Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Kona, Big Island, Hawaii, USA, 2015.

[98] 上海交通大学. 船舶与海洋工程水动力学求解器软件 naoe-FOAM-SJTU[CP]. 著作权登记号: 2012SR118110.

[99] Liu X, Wan D. Numerical Simulation of Ship Yaw Maneuvering in Deep and Shallow Water[C]. The Twenty-fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers, 2015.

[100] 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.

[101] 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.

[102] Simpson T. Comparison of Response Surface and Kriging Models in the Multidisciplinary Design of an Aerospoke Nozzle[R]. ICASE, NASA Langley Research Center, NASA/CR-1998-206935, 1998.

[103] HUNT J, WRAY A, MOIN P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows[R]. Center for Turbulence Research Report CTR-S88, Stanford University, USA, 1988.



致 谢

时光如白驹过隙，转眼间已在交大度过了两年半的美好时光。或许再难感受到思源湖畔的春意，又或许赶不上课题组的下一次踏青，我便要离开这个美丽的地方，前往人生的下一站。这篇硕士毕业论文，是对我这两年半来学习工作的总结，同时也承载了我对交大、对课题组的美好回忆。借此机会，我要向所有帮助过我，陪伴过我，或者支持过我的，那些可爱的人儿，表示最真诚的感谢！

首先要感谢我的导师万德成教授，感谢这些年来万老师在学习和科研工作中对我的悉心指导。万老师每次给予的建议都十分中肯，而且总能抓住问题的要害，能给我很大的启发。万老师不仅会“教书”，还能“育人”，他经常向我们强调，作为一个科研工作者必须要有刻苦钻研的精神和严谨缜密的思维，我十分敬佩万老师认真负责、兢兢业业的科研态度，并以此来要求自己。生活上，万老师也给予了我们最大的关心，鼓励实验室同学定期组织文体、户外活动，资助实验室购买图书和水果，使我们的生活更加丰富多彩。另外，还要感谢水下工程研究所的赵敏老师在科研项目中对我的指导，以及交大老师们对我的学习指导。祝愿老师们身体健康，幸福美满！

感谢船型优化研究小组温柔体贴的缪爱琴师姐，勤勉好学的漆小舟，才思敏捷的刘鑫旺，活泼可爱的王晋楷师弟，感谢你们一直以来与我并肩作战，你们的帮助和关心让我感受到了团队的力量和温暖。希望缪师姐、“旺仔”和师弟继续努力，为船型优化研究工作做出更多辉煌成果，也希望既是研友、又是室友、更是朋友的漆小舟能早日邂逅他的另一半！

感谢王建华、赵伟文、张晨亮、吴建威、刘晓义、端木玉、罗天、刘正浩、何东亚、艾勇、夏可、付博文等师兄师姐在科研学习过程中对我的无私帮助，你们耐心的解答对我的知识水平有很大的提高。感谢木兰楼 A704 的许璐荣、郭浩、谢康迪、余安正、李奇、王哲、王帝、王秋雯、武磊，有你们的陪伴，科研旅途上充满了欢声笑语。感谢课题组的邓迪、黄扬、孙晨光、陈铠杰、段鑫泽、宋家琦、李思明、吴迪、田鑫等同学，安筱婷、张晓嵩、张冠宇、赵旻晟、李勇、宁旭等师弟师妹，与你们的思维碰撞给了我很多灵感，拓展了我的知识面。愿你们毕业后能为祖国的各行各业作出卓越的贡献！

另外，我要好好感谢我的父母和家人，不论我是无知懵懂的学生，还是即将步入社会的成年人，在他们眼里，我都是那个长不大的孩子。以前离家近不知体



会，在远离家乡的这两年，我越发感受到他们对我深沉而无私的爱，以及背后默默的付出和无条件的支持，我要对你们说一句：我爱你们。

最后，感谢每一位给过我帮助、支持和影响过我的人，你们都是最最可爱的人儿，我会借助你们的力量，朝着我的目标不懈奋斗：为国家和社会释放自己的光与热，成为像你们一样可爱的人。



攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] 陈泰文, 万德成. CFD 计算分析水下潜器运动阻力性能[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2018, 33(2): 143-149.
- [2] **Chen T**, Miao A, Wan D. Ship Hull Form Optimization Design for KCS Considering Uncertainty of Ship Speed[C]. Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference, Sapporo, Japan, June 10-15, 2018.
- [3] 陈泰文, 何东亚, 万德成. SST-DES 方法计算分析水下机器人的水动力性能 [C]. 第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会文集, 长春, 2017: 1048-1058.
- [4] Miao A, **Chen T**, Wan D. Robust design optimization of ship hull form based on CFD considering uncertainty[C]. International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, Chengdu, China, October 15-18, 2017.
- [5] 缪爱琴, 漆小舟, 陈泰文, 万德成. 基于 OPTShip-SJTU 的集装箱船船型优化设计[C]. 复旦大学博士生学术论坛, 上海, 2017.



16004312

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《基于 OPTShip-SJTU 的面向快速性的船型优化》，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：陈泰文

日期：2019 年 1 月 10 日



16004312

上海交通大学 学位论文版权使用授权书

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。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密☐，在____年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密☒.

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：陈泰文

指导教师签名：

日期：2019年1月10日

日期：2019年1月10日



16004312

上海交通大学硕士学位论文答辩决议书



116010910172

姓 名	陈泰文	学号	116010910172	所在学科	船舶与海洋工程
指导教师	万德成	答辩日期	2019-01-11	答辩地点	闵行校区木兰船建大楼A1006
论文题目	基于OPTShip-SJTU的不同类型船舶的线型优化				

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:

论文针对基于OPTShip-SJTU的不同类型船舶的线型优化展开较为系统全面的研究, 选题正确, 学术前沿性强, 具有重要的理论意义和实际应用价值。

该论文采用自主开发的船体线型优化软件OPTShip-SJTU, 先后以中高速船、低速肥大船以及高性能多体船为研究对象, 对不同类型船舶较关注的性能进行了单目标或多目标优化, 为各类实际船舶的线型优化问题提供了一定的指导和借鉴; 其中针对具有挑战性的低速肥大船线型优化问题, 进行了深入的研究和探索, 在综合水动力性能优化方面取得了良好的研究成果; 另外以某高性能多体船为研究对象, 对实船进行了片体线型和片体间距优化, 取得了良好的优化成果, 具有较强的使用价值。

论文研究内容丰富, 技术路线正确, 内容丰富, 分析有据, 研究结果翔实可信。论文结构完整, 条理清楚, 逻辑性强, 论文撰写行文流畅, 图表规范。论文已达到硕士学位论文的要求。论文工作表明, 作者已掌握本学科坚实的基础理论和系统的专业知识, 具有较强的独立从事科研工作的能力。

论文作者在答辩时思路清晰, 能正确地回答问题。经答辩委员会投票表决, 全票(5票)一致同意通过论文答辩, 并建议授予工程硕士学位。

2019 年 (月 11 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	朱仁传	教授	上海交通大学	
	委员	王金宝	研究员	中国船舶工业集团公司第七〇八研究所	
	委员	卢东强	研究员	上海大学	
	委员	刘成	长聘教轨副教授	上海交通大学	
	秘书	邹璐	助理研究员	上海交通大学	