# 船体型线数值优化软件 OPTShip-SJTU 优化 模块开发

- 硕士研究生: 刘晓义
- 学 号: 1140109190
- 导师:万德成教授
- 申 请 学 位: 工学硕士
- 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:2017年1月
- 授予学位单位:上海交通大学

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

Candidate:	Liu, Xiaoyi
Student ID:	1140109190
Supervisor:	Prof. Wan Decheng
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Naval Architecture and Ocean Engineering
Affiliation:	School of Naval Architecture, Civil and Ocean Engineering
Date of Defence:	Jan, 2017
Degree-Conferring-Institution:	Shanghai Jiao Tong University

## 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《船体型线数值优化软件 OPTShip-SJTU优化模块开发》,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:

### 日期: 年 月 日

## 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: 指导教师签名:

日期: 年月日 日期: 年月日

### 船体型线数值优化软件 OPTShip-SJTU 优化模块开发

### 摘要

数千年来,船舶一直是人类进步历程中的重要工具,船舶技术的 进步,也为经济、社会的发展提供了保障。随着近些年来能源供应的 日趋紧张,同时出于保护环境和提高经济效益的考虑,针对船舶提高 能效和节能减排的研究逐渐受到学术界和工程界共同关注的课题。而 船舶的型线设计,作为船舶设计过程中的重要环节,一直是船舶设计 者渴望进一步改善的环节。

为了实现船舶型线的优化设计,很多不同的方法被不断提出和实现。然而,无论是何种优化设计方法,都离不开一个高效、合理的优化算法。作为驱动型线优化设计的环节,优化算法的选择决定了该优化方法能否找到一个最优的方案,这也是船舶设计的最终目标。因此,本文对于优化算法的研究和开发,对实现船型优化有重要意义。

另一方面,船舶型线优化过程中,其水动力性能是优化的关键目标,而优化设计又需要反复迭代的过程,因此降低水动力性能的预报成本也是优化过程必须考虑的内容。当前主流的计算流体力学工具往往都对计算机硬件和计算时间有很高要求,本文探索了利用高效率的数值预报工具和近似模型技术相结合的方式,大大提高了水动力性能的预报效率,也为未来切实有效的船型优化打下基础。

本文首先对多种优化算法和近似模型技术进行了调研,并总结了 各方法的基本特点与优劣之处。接着,本文以 C++程序语言为基本开 发工具,分别实现了单目标遗传算法、多目标遗传算法、响应面法、 克里金方法,并对每种方法做了验证,从而实现了优化算法和近似模 型模块。

Ι

在此基础上,本文将优化算法和近似模型模块,船型变换模块以 及船舶水动力性能分析模块进行集成,形成全新的船体型线数值优化 设计软件 OPTShip-SJTU,通过若干优化实例测试考察该模块及 OPTShip-SJTU 软件的可用性,并对部分优化结果进行验证,确保 OPTShip-SJTU 软件及其优化结果的可靠性。

关键词:船型优化设计、优化算法、近似模型、计算流体力学、OPTShip-SJTU

### ABSTRACT

For thousands of years, the ship has been an important tool in the process of human progress, ship technology, but also for economic and social development has provided a guarantee. With the energy supply becoming more and more tense in recent years, the study on improving the energy efficiency and energy saving and emission reduction for the ship has been paid more and more attention by the academia and the engineering community for the sake of protecting the environment and improving the economic efficiency. The ship line design, as an important part of the ship design process, has been the ship designers' eager to further improve the link.

Many different methods have been proposed and realized in order to realize the optimal design of ship line. However, no matter what kind of optimization design methods, are inseparable from an efficient and reasonable optimization algorithm. As the link of optimal design of drive line, the choice of optimization algorithm determines whether the optimization method can find an optimal solution, which is the ultimate goal of ship design. Therefore, the research and development of the optimization algorithm is very important to realize the ship type optimization.

On the other hand, hydrodynamic performance is the key objective in the process of ship profile optimization, and optimization design requires repeated iteration process. Therefore, reducing the forecast cost of hydrodynamic performance is also the optimization process must consider. At present, mainstream computational fluid dynamics (CFM) tools often have high demands on computer hardware and computation time. This paper explores the combination of high-efficiency numerical prediction tools and approximate model techniques, greatly improving the prediction efficiency of hydrodynamic performance. For the future effective and effective basis for ship optimization.

In this paper, a variety of optimization algorithms and approximate model techniques are investigated, and the basic characteristics and advantages and disadvantages of each method are summarized. Then, using the C++ programming language as the basic development tool, the single-objective genetic algorithm, the multi-objective genetic algorithm, the response surface method and the Kriging method are implemented respectively, and each method is verified to achieve the optimal algorithm and approximation Model module.

On this basis, this paper integrates the optimization algorithm and the approximate model module, the ship-type transformation module and the ship hydrodynamic performance analysis module to form a new software OPTShip-SJTU for the ship hull line numerical optimization design. Through several optimization examples, OPTShip-SJTU software and validate some of the optimization results to ensure the reliability of OPTShip-SJTU software and its optimization results.

KEY WORDS: Ship Optimization Design, Optimization Algorithms, Approximation Model, Computational Fluid Dynamics, OPTShip-SJTU.

## 目 录

<del>摘要</del>				Ι
ABSTRACT-				III
<del>目录</del>				V
<del>图录</del>				VIII
<del>. ह. ज</del> ्र				Х
第一章 <del>绪论</del>				1
1.1 研究背景 <del>与意义</del>				- 1
1.2 最优化技术国内外	卜研究 <del>进展</del>			2
1.2.1 基于梯度的优	化算法			3
1.2.2 随机搜索优化	算法			4
1.3 近似模型技术国内	1外研究 <del>进展</del>			7
1.3.1 试验设 <del>计方法</del>	- 			- 8
1.3.2 近似模型构建	方法			8
1.4 船型优化设计软件	‡ OPTShip-SJT	U <del>框架</del>		9
1.5 本文主要 <del>王作</del>				9
第二章 优化算法与近似	模 <del>型技术</del>			12
2.1-引言				12
2.2 优化 <del>算法</del>				13
2.2.1 基于梯度的局	部优化算法			14
2.2.2 随机搜索的全	局优化算法			14
2.3 近似模型 <del>技术</del>				19
2.3.1 试验设 <del>计方法</del>	1999 1			·20
2.3.2 近似模型构建	技术			20
2.4 本章 <del>小结-</del>				23
第三章 船型变换与水动	力性能预报			24
3.1 引言				24
3.2 船型变 <del>换模块</del>				24
3.2.1 平移法	-			24
3.2.2 径向基 <del>函数法</del>	here d			·25
3.2.3 自由变 <del>换方法</del>				·27

3.3 水动力性能数值预报模块 — — — — — — — — — — — — — — — — — — —		28
3.3.1 基于 Neumann-Michell 理论的兴波阻力预报-		28
3.3.2 基于 RANS 的水动力性能综合预报		 29
3.4 本章 <del>小结</del>		30
第四章  基于不同优化算法的船型优 <del>化实例</del>		31
4.1 <del>····································</del>		31
4.2 基于序列二次规划的 Series60 船型优化设计		- 31
4.2.1 目标函数		 32
4.2.2 设 <del>计变量-</del>		 33
4.2.3 优化结果		 34
4.3 基于单目标遗传算法的 Series60 船型优化设计		37
4.3.1 目标函数		 38
4.3.2 设 <del>计变量</del> — — — — — — — — — — — — — — — — — — —		 38
4.3.3 优化结果与分析 ———		39
4.4 本章 <del>小结</del>		42
第五章 结合近似模型的船型优化 <del>实例</del>		43
5.1 <del>····································</del>		43
5.2 基于多目标遗传算法的 DTMB5415 船型优化设计		43
5.2.1 目标函数		 44
5.2.2 设 <del>计变量</del>		 44
5.2.3 优化结果与分析 ———		45
5.3 结合 RANS 求解器的 DTMB 5415 船型优化设计-		49
5.3.1 目标函数		 49
5.3.2 设计变量和近似 <del>模型</del>		50
5.3.3 优化结果与分析 ———		50
5.4 基于多目标遗传算法的 4250TEU 船型优化设计-		52
5.4.1 目标函数和设 <del>计变量</del>		53
5.4.2 近似模型 <del>构建</del>		· 55
5.4.3 方差分析		 55
5.4.4 优化 <del>结果</del>		 56
5.4.5 对优选船型 <del>的验证</del>		60
5.5 本章 <del>小结</del>		64

第六章 总结与 <del>展望</del>		 · 65
6.1 全文总结		 65
6.2 研究展望-		 65
参 考 <del>文 献</del>		 66
<del>致一谢</del>		 71
攻读硕士学位期间已发表	或录用 <del>的论文</del>	 73

## 图录

冬	1-1	船型优 <del>化流程</del> ————————————————————————————————————	2
冬	1-2	目前主要优化算法的分类	3
图	1-3	文献[4]中的初始船型,基于变梯度法,序列二次规划,最速下降法优	化
的	船型	<u> </u>	4
冬	1-4	文献[17]中对 DTMB5415 船进行的优化船模模型试验-	6
图	1-5	船型优化设计软件 OPTShip-SJTU 框架 — —	9
图	2-1	引入近似模型的船型优化流程	13
图	2-2	遗传算法基本流程	16
图	2-3	Alckley 函数 <del>示意图</del> ————————————————————————————————————	17
图	2-4	遗传算法求解函数优化问题收敛过程图	17
图	2-5	本论文程序计算结果与标准程序结果[44]对比-	19
图	2-6	三种试验设计方法的对比 ————————————————————————————————————	20
图	3-1	平移法示意图 ————————————————————————————————————	25
图	3-2	FFD 方法局部 <del>坐标系</del>	27
图	3-3	NM 预报总阻力系数与试验值的比较	29
图	3-4	naoe-FOAM-SJTU 程序框架	30
图	4-1	Series 60 船型模型(水下 <del>部分)</del> ————————————————————————————————————	31
图	4-2	Series 60 船体表面网格	32
图	4-3	Series 60 船体表面网格及自由面网格 — —	33
图	4-5	Series 60 船型优化结果-横向型线对比	34
图	4-6	Series 60 船型优化结果-纵向型线对比	35
图	4-7	Series 60 船型优化结果-表面压力分布对比 -	35
图	4-8	Series 60 船型优化结果-船体首部表面压力分布对比-	36
图	4-9	Series 60 船型优化结果-船体自由面兴 <del>波对比</del>	37
冬	4-1(	0 Series 60 船型优化结果-船体表面兴波高度对比	37
冬	4-12	2 优化过程中的兴波阻力系数迭代	40
图	4-13	3 基于遗传算法的 Series 60 船型优化结果-纵向型线对 <del>比</del>	40
冬	4-14	4 Series 60 基于遗传算法的船型优化结果-船体表面兴波高度对比-	41
图	4-15	5 基于遗传算法的 Series 60 船型优化结果-船体自由面兴波对比	41
图	4-16	6 基于遗传算法的 Series 60 船型优化结果-表面压力分布对比-	42

IX

## 表 录

2
2
3
4
8
9
9
4
Ę
4
5
Ł
17
Ę
9
П
<b>;</b> 0
0
54
5
;9
60

### 第一章 绪论

#### 1.1 研究背景与意义

船体型线优化设计是船舶设计过程中的重要环节,其设计水平将直接影响到 船舶的水动力性能、综合航行性能和经济营运效益等。随着船舶行业的不断发展, 其设计水平也不断提高,传统的船体型线设计方法也已经很难在局部寻找到更优 设计,如何得到具有更优性能的船体型线已经成为船舶设计者亟需解决的问题。 而近些年来,我国的造船工业不断发展,党中央提出要将我国建成世界造船大国、 造船强国,显而易见的是,对船舶做出有益于其经济性能的改进,已然成为了十 分重要的研究课题。

船舶设计者在设计过程中需要考虑诸多性能,包括快速性、操纵性、耐波性 等等。其中,船舶的快速性对船舶的能耗水平有决定性的影响。快速性又细分为 船舶阻力性能和推进性能,降低船舶阻力和提高船体推进效率都能起到节能降耗 的作用。目前,为了降低船舶的能耗水平,船舶设计者提出了许多措施:优化船 体型线设计,加装船舶节能装置(能量回收装置),合理规划船舶运动姿态、速度 等等。一个更好的船体型线设计,有助于提高船舶的各类性能。传统的型线设计 方法往往是通过经验丰富的船舶设计人员不断地修改母型船,经过模型试验,对 所有的设计方案进行验证,并从中选择最优的设计方案,以此作为改进的新船型。 这样的设计方法不仅对设计人员提出了很高的要求,效率和经济性也较低,还很 难得到最优的设计方案。近些年来,随着计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的发展和计算机科学的进步,一些学者开始了基于计算流体力 学的船舶选型优化设计,这样的优化设计虽然在一定程度上降低了模型试验的成 本,提高了优化效率,但仍然未能摆脱传统选型设计的思路,需要依赖设计者的 经验,并不能做到真正意义上的船型优化,得到的新船型也只是"较优解",而非 "最优解"。正因如此,船形优化设计方法需要进行全面改进。

为了摆脱传统的船型设计过程中对船舶设计者经验的依赖,真正实现船体型 线优化设计的自动化,一套全新的船体型线设计流程应运而生。该设计流程将优 化算法、近似模型方法、船型变换方法以及水动力性能评估方法结合起来,形成 了完全不需要人工干预的崭新流程,不仅避免了设计者自身受困于经验的弊端, 也大大提高了设计效率,还将得到远远优于传统设计流程的优化船型。在整个优 化流程(图 1-1)中,优化模块的设计是串联各个模块的核心,合理有效的优化算 法和策略将提高整体优化的效率,确保设计空间中的最优解被搜索到。因此,对 优化模块的设计与开发具有重要意义。



图 1-1 船型优化流程 Fig.1-1 Flow chart of shape optimization design

### 1.2 最优化技术国内外研究进展

最优化技术是解决船体型线设计问题的必要手段,近些年来,不同的工程领 域中出现了各种各样的优化算法和策略,在船舶设计领域,也有很多学者应用不 同的优化算法对各种船型进行了优化设计。然而,如何选取合适的优化技术和策 略仍然是船体型线设计中需要着重考虑的问题。采用合适的优化技术和策略可以 更有效迅速地寻找到最优解。

现有的优化算法主要可以分为两类:分别是基于梯度的优化算法和随机搜索的优化算法(也叫启发式算法),如图 1-2 所示。



图 1-2 目前主要优化算法的分类 Fig.1-2 Main Types of Current Optimization Algorithms

#### 1.2.1 基于梯度的优化算法

基于梯度的优化算法主要有:变梯度方法、最速下降法、序列线性规划以及 序列二次规划方法等。这些优化算法已经发展的十分成熟,在工程领域中有很多 应用,其计算效率较高、优化过程很快。这一类算法是最早在船舶设计领域被采 纳的优化算法,有诸多学者应用这样的优化算法对船型优化进行了探索。

早在 1998 年,Harries 就利用分步优化技术<sup>[1]</sup>,对 LNG 船的快速性进行了优 化设计,该研究首先使用经验公式方法对船体型线设计进行初步优化,之后利用 CFD 方法进行了进一步的细节优化。同一年,Huan<sup>[2]</sup>利用伴随矩阵的方法,并结 合一势流求解器(求解自由面)实现了对船型的优化设计。2001 年,Tahara 等<sup>[3]</sup> 学者通过参数模型法来控制船型生成,并引入六个设计参数,利用序列二次规划 方法对 DTMB5415 的首部、声纳罩以及尾部的型线进行了优化。同一年,Peri 等 <sup>[4]</sup>学者以总阻力和船艏兴波波幅作为目标函数,实现了某油船球鼻艏的几何外形 进行优化,该研究以贝塞尔曲面(Bezier Patch)方法实现船体曲面重构,利用计 算流体力学方法预报船舶阻力与运动,分别基于三种不同的优化算法:变梯度法, 序列二次规划,最速下降法进行优化计算,同时通过模型试验对优化结果进行了 验证。



图 1-3 文献[4]中的初始船型,基于变梯度法,序列二次规划,最速下降法优化的船型 Fig.1-3 Original ship and optimized ships based on different optimization algorithms in reference

#### 1.2.2 随机搜索优化算法

随着现代优化理论的不断发展,基于随机搜索思想的优化算法开始愈发引人 注目。这类算法不需要求解目标函数的梯度,而只需要得到目标函数值,因而对 系统模型的要求很低,对无法求解目标函数梯度的问题同样具有非常强的适应性 和鲁棒性。应用这类算法,还可以避免陷入局部最优解的情况,搜索范围的广度 可以由设计者自行确定,其基本流程往往都是由初代的随机个体开始,逐步搜索 到较优的群体,不断地迭代过程中实现收敛并寻找到最优解。

常见的随机搜索算法包括模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)、进化算法(Evolutionary Algorithm, EA)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA)以及粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)等。

最早的随机优化算法是由 Metropolis 提出的模拟退火算法<sup>[5]</sup>,该算法的思想 受到了统计热力学中热平衡问题的启发,模拟了高温物体退火的过程。它是一种 基于概率的算法,在迭代的过程中,既会出现可以是目标函数值变优的"更好的" 点,也有概率出现"更差的"点,是否接受"更差的"的点,取决于当前温度下的接受 概率。随着温度的下降,接受概率也逐渐下降。该算法可以有效避免陷入局部最优解的情况。在许多工程问题中已经有了广泛的应用。

遗传算法是受到生物进化理论和遗传学理论的启发而提出的,在遗传算法中 模拟了自然界生物进化的过程和机制。参考借鉴了自然界的自然选择规律和交叉 遗传规律,同时具备自然界随机性的特点,是一种人工智能的随机搜索优化算法。

早在上个世纪60年代,生物学家Fraser<sup>[6]</sup>就在论文中提出了遗传算法的雏形, 包括基因突变和选择交叉作用的进化过程通过仿真的方式被成功模拟。1967年, Bagley<sup>[7]</sup>首次提出遗传算法(Genetic Algorithm)一词,这是遗传算法首次被应用 到实际问题当中。该论文中涉及到的变异、选择、交叉等操作和目前使用的遗传 算法几乎完全一致,该论文还提出了在遗传进化过程中不同阶段采取不同选择概 率的重要性,该方法可以有效避免遗传中的早熟现象。包括自动调整策略和适应 度定标的概念也首次被提出,这都是当前遗传算法中常见的技术。第一本系统阐 述遗传算法的专著是由 Holland<sup>[8]</sup>在 1975年完成的,De Jong 的博士论文<sup>[9]</sup>同样被 公认为是遗传算法的基础。上世纪 80年代开始,遗传算法已经被广泛应用于诸多 领域,Goldberg<sup>[10,11]</sup>扩展了其应用,在管道系统的优化设计和机器学习问题中都采 用了遗传算法。Koza 提出遗传编程(Genetic Programming, GP)的概念,将遗传 算法应用到了计算机程序的优化设计和自动开发,并将其扩展到了人工智能和机 器学习领域。

直到上世纪 90 年代,遗传算法才真正应用到多目标优化问题中,基于 Pareto 序列的多目标遗传算法成为研究的重点,还有一些学者提出了不基于 Pareto 序列 的遗传算法,也受到一定关注。1985 年<sup>[12]</sup>,第一个所谓的多目标遗传算法于被 David Schaffer 提出,其被称为基于向量评估的遗传算法,该算法并不是真正意义 上的多目标遗传算法,它只能收敛于某一区域,无法得到完整的非支配解集。真 正意义上可以获得非支配解集的多目标优化算法是 1995 年由 Srinivas 和 Deb<sup>[13]</sup>提 出的,他被称为非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic algorithms, NSGA),该算法是根据个体之间两两的支配关系排序完成目标函数赋值的。尽管 该方法在提出之初,存在包括计算复杂度高、缺乏精英策略等实际问题,却也获 得了广泛的应用。2000 年,Deb<sup>[14]</sup>本人对 NSGA 方法存在的问题做出了改进,提 出了 NSGA-II,该方法获得了巨大的成功,成为当前应用最为广泛的多目标遗传 算法。

粒子群优化算法是和多目标优化算法同期产生的,1995 年<sup>[15]</sup>, Eberhart 和 Kennedy 在根据鸟群的捕食行为发展了该算法。在粒子群算法中,有着与其他进

化类算法相似的群体、个体和进化概念,不同之处在于,每个个体被看做是一个 没有重量和体积的飞行粒子,总是以一定方式,向个体的最优位置和群体最优位 置处聚集,从而实现个体进化。

自本世纪初以来,随机搜索优化算法逐渐开始应用在船体型线优化设计当中。 在这当中,Campana、Peri和 Tahara 等人是最为活跃的学者,他们在船型优化领 域展开了长期的合作<sup>[16-21]</sup>,并取得了丰富的成果。2003年<sup>[16]</sup>,他们在对 DTMB5415 船型进行了多学科设计优化,优化算法为遗传算法,以总阻力、船体运动响应(升 沉和纵倾)为优化目标,采用"贝塞尔补丁"(Bezier Patch)的方法进行几何重构, 得到了一组非支配解集和优选船型。2006年,他们利用自主开发的"基于模拟的 设计"(Simulation Based Design, SBD)软件包<sup>[17]</sup>,对 DTMB 5415船型进行了进 一步优化,结合多目标遗传算法,得到了一组非支配解集,并进行了船型优选, 对一个优选船型进行了模型试验验证(图 1-4)以及不确定度分析。在此基础上, 2007年他们又将粒子群算法<sup>[18]</sup>集成到 SBD 工具当中,并对集装箱船进行了优化 设计。之后,他们将这套日趋成熟的工具应用到多条船型<sup>[19-20]</sup>,包括 Delft 372 双 体船、JHSS 双体船等等。



图 1-4 文献[17]中对 DTMB5415 船进行的优化船模模型试验 Fig.1-4 Model test of an optimized model based on original model DTMB5415 in reference

另一方面,他们还对优化算法和策略进行了探索,提出将整个船型优化进程 划分成全局搜索阶段和局部搜索阶段两部分,在全局搜索阶段,使用势流求解器 和全局优化算法,得到最优解所在区域后,在缩小的设计空间中使用高精度的 CFD 求解器和基于梯度的优化算法,最终找到最优解。Campana 和 Liuzzi 等人<sup>[21]</sup>还提 出了新的确定性非梯度粒子群算法(Deterministic Derivative-Free Particle Swarm Optimization, DDFPSO),并对其进行了数值测试,结果证明其效率较高并能寻找 到全局最优解,还将其应用在了 S175 船型的优化设计当中。 此外,乔治梅森大学的 Chi Yang 等人也对船型优化设计进行了持续的研究<sup>[22-24]</sup>。他们开发了一套基于势流理论和遗传算法的船型优化程序<sup>[22]</sup>,并对 S175 和 Series 60 进行了优化设计。Kim 在其博士论文<sup>[23]</sup>中对船型优化做了全面的分析介绍,并开发了一款涵盖船型变换、优化模块和 CFD 水动力性能计算的完整工具,在其优化模块中采用了单目标和多目标遗传算法。Kim、Yang 等<sup>[24]</sup>利用自主开发的一个基于势流理论的船舶水动力性能优化工具,采用多目标遗传算法对 Series 60 船型进行了优化设计。

国内的研究者也于同期开展了一些船型优化设计工作,相比之下,他们更多 地使用势流求解器和商业软件,在优化算法上较多采用商业软件中的现有程序。 冯佰威等<sup>[25]</sup>采用遗传算法对集装箱船船首进行了优化,利用 SHIPFLOW 进行兴波 阻力预报,Holtrop 方法预报粘压阻力和摩擦阻力,整套流程集成在 iSIGHT 优化 平台中,利用叠加调和方法(Morphing Approach)成功实现了对两个初始船型的 线性叠加重构,并以总阻力为优化目标得到了最优的重构船型。张宝吉等[26]通过 日本铃木和夫提出的船型修改函数变换船型,借助 Dawson 方法和遗传算法,以 总阻力为优化目标,对某高速巡逻艇进行船型优化,得到了总阻力下降 13.1%的 最优船型。李胜忠<sup>[27]</sup>以自由变形技术(Free-Form Deformation, FFD)实现船体表 面的几何重构,以粒子群优化算法(PSO)为优化格式对阻力性能优异的 3000T级 船舶进行了优化,分别进行了设计船型与优化船型的模型试验,试验结果表明优 化船型在设计航速时模型总阻力减小了 6.3%,剩余阻力系数减小了 14.5%: 在整 个航速范围内,优化船型总阻力均有大幅减小。李胜忠的工作[27-29]是国内较早的 基于 CFD 的船型优化设计,其博士论文深入介绍了基于 CFD 的船型优化设计方 法,构建了基于粒子群算法的船型优化软件,采用 Bezier Patch 方法和 FFD 方法 进行几何重构,对DTMB5415和某肥大低速船分别进行了基于 RANS 方法的水动 力性能优化。

#### 1.3 近似模型技术国内外研究进展

近似模型技术也是随着大规模数值模拟计算的普遍应用,而逐渐进入人们视 线的。由于高精度的 CFD 计算需要大量的计算时间和机器成本,近似模型技术越 来越受到重视和广泛应用,近似模型技术主要包括试验设计方法和近似响应模型 方法两部分,下面将分别进行阐述。

#### 1.3.1 试验设计方法

试验设计方法是为了降低数值模拟的计算成本、同时尽量保证样本群体的精 度,从数理统计学的角度确定试验设计方案的一种方法。

该概念自提出以来,有许多种试验设计方法被提出和应用,其中最为流行的 有<sup>[30]</sup>: Monte Carlo 抽样、正交设计、随机拉丁方设计、拉丁超立方设计以及优化 拉丁方设计等。其中,优化拉丁方设计因其良好的均匀性和正交性,已经成为最 受欢迎的试验设计方法之一。

#### 1.3.2 近似模型构建方法

近似响应模型是为了近似表达复杂问题,降低计算难度和计算成本,所提出的数学模型,在优化问题中有着广泛的应用。不同的近似响应模型对于各种问题 有着不同的适应性,较为常见的近似模型主要有<sup>[31]</sup>:响应面近似模型(Response Surface Method, RSM)、Kriging 模型、神经网络模型和径向基函数模型等。在当 前的空气动力学研究中,Kriging 模型被公认为最有效的近似响应模型。

Peri 等<sup>[32]</sup>同样是最早将近似技术引入基于 CFD 的船型优化当中的学者,他们的研究解决了数值模拟耗时长、耗费高的弊端,并对 RSM、VFM、Kriging、RBF等近似模型分别进行了研究,得到了详细的分析结果。Kim、Yang 等<sup>[24]</sup>在响应面近似模型的基础上,开发了一个基于势流理论的船舶水动力性能优化工具,该研究还利用了数据挖掘(Data Mining)技术对船体型线进行了深入分析,并利用方差分析(Analysis of Variables, ANOVA)技术对设计变量和目标函数的关系进行了深入探索。Series 60 船型作为母型船,兴波阻力作为目标函数被该工具成功进行了优化,响应面模型的采用大大加速了其求解兴波阻力的过程。国内学者在这一领域也做出了许多工作。梁军等人<sup>[33]</sup>采用响应面近似模型,以阻力为优化目标函数,在 OPTIMUS5.2 优化平台中对 DTRCModel 5470 进行了首部线型优化,并通过模型试验验证了优化结果。程成等人<sup>[34]</sup>通过 iSIGHT 优化平台,结合 FLUENT粘性流体数值模拟软件和 UG 模型构建软件,对螺旋桨敞水性能进行了优化设计,该研究还对近似模型方法进行了分析研究。

上述内容涵盖了船体型线优化设计中的最优化技术和近似模型技术,这两项 技术共同构成了船体型线优化设计中的优化模块。通过对这两项技术的发展趋势 分析来看,基于梯度的局部优化算法劣势较为明显,逐渐被随机搜索优化算法所 取代;同时,单目标的随机搜索优化算法也无法取得完整的非支配解集,结合近 似模型技术的多目标优化策略日趋重要。

### 1.4 船型优化设计软件 OPTShip-SJTU 框架

本文的主要内容是优化算法和近似模型技术的开发,结合船型变换方法以及 NMShip-SJTU 求解器<sup>[35]</sup>和 naoe-FOAM-SJTU 求解器<sup>[36]</sup>,共同组成了基于水动力 性能预报的船型优化软件 OPTShip-SJTU<sup>[37]</sup>。软件框架如图 1-5 所示



Fig.1-5 Framework of ship hull optimization program OPTShip-SJTU

#### 1.5 本文主要工作

本论文将在前述研究现状的基础上,深入分析考核各类适合船型优化设计过 程的优化算法和分析工具,以及船型变换模块、船舶水动力性能分析模块。结合 船型优化设计的船型变换模块和船舶水动力性能分析模块,集成不同的优化算法 以及分析工具,实现船体型线数值优化设计软件 OPTShip-SJTU 的整体开发工作。 并利用船体型线数值优化设计软件 OPTShip-SJTU,对多个船型进行不同目标的船 体型线优化。

本论文的具体工作内容如下:

 利用基于梯度方法的局部优化算法,对船体型线设计进行快速优化。本论 文将采用基于序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)的 局部优化策略。该方法的主要优点是,优化效率较高,能迅速得到较优的 船型,但容易陷入局部最优解。

- 2. 开发全局优化算法程序,对船体型线设计进行全局深入优化。主要包括单目标遗传算法(Single Objective Genetic Algorithm, SOGA)和多目标遗传算法(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)。本论文将主要采用NSGA-II算法。由于遗传算法本身的特性,该程序得到的最优解或最优解集是全局最优船型,但由于船舶水动力学求解过程耗时较高,该方法的计算成本很高。
- 3. 探索和开发基于近似模型的全局优化算法,实现对船体型线的高效全局优化。本论文将采用在空气动力学领域已有大规模应用的响应面模型(RSM)和克里金(Kriging)方法,结合多目标遗传算法,对不同船型的静水阻力性能分别进行优化,并对两种近似模型进行比较,对船体型线设计的优化策略提出建议。同时利用方差分析(ANOVA)手段,对船体型线设计进行分析。
- 4. 将船型变换模块和船舶水动力性能分析模块与优化模块集合成船体型线数值优化设计软件 OPTShip-SJTU。本论文对平移法、RBF 方法和 FFD 方法进行研究和应用,同时也对 Neumann-Michell 理论和 RANS 方法求解船舶水动力学问题进行研究。结合 NMShip-SJTU 和 naoe-Foam-SJTU,分别实现基于势流和粘流的船体型线数值优化设计。

全文各章节主要内容概括如下:

第一章介绍了本论文的研究背景与意义,国内外主要研究进展,对本文将要 研究的多种算法和模型做了简要概述。随后介绍了本文的主要研究目标,以及将 要实现的研究内容,概述了本文的框架结构。

第二章从优化算法和近似模型技术的角度,分别对不同的优化算法和近似模型技术做了详细介绍和分析,对不同方法的优缺点做了深入探讨,并对本文重点实现的单目标遗传算法和多目标遗传算法的流程进行了细致介绍。同时对实现的单目标和多目标遗传算法的程序都进行了验证,保证了后续工作的可靠性。

第三章介绍了本文涉及到的 OPTShip-SJTU 采用的船型变换模块和水动力性 能评估模块,这两个模块均是船型优化过程中不可或缺的模块。对船型变换和水 动力性能评估的开发应用也是船型优化需要考虑的重要问题。

第四章是在第二、三章对于优化算法、船型变换以及水动力性能评估的研究 基础上,对于 Series60 标准船型进行了优化设计,主要采用了基于梯度的序列二 次规划算法和随机搜索的遗传算法,两种方法的优缺点在这两个优化设计实例中均有体现,同时也验证了本文采用方法的可行性,对程序的稳定性也做了测试。

第五章在第四章的基础上,加入了近似模型技术,同时对优化目标都提高为 多目标,这在一定程度上使优化问题更加复杂。同时,优化船型的复杂度也有一 定提高,分别为 DTMB5415 和 4250TEU,本章对近似模型和基于 RANS 的粘性 流体求解器的船型优化也做了进一步验证。

第六章为全文研究工作的总结和未来研究的展望。首先分析了本文的创新点 和不足,然后对后续进行必要的、更深入的研究方向作了展望。

### 第二章 优化算法与近似模型技术

#### 2.1 引言

优化算法是驱动整个船型优化流程的关键环节,从是否需要计算梯度的角度, 优化算法可以分为两类:一类是基于求解梯度的优化算法,一类是基于随机搜索 的优化算法。前者的搜索方向和搜索步长都是由局部信息(即梯度)决定的,其 能在较快时间内实现收敛并找到局部最优值,但其在处理多峰极值问题上有一定 不足,容易陷入局部最优解;后者则是出于克服该不足,在近几十年内兴起并被 广泛采用的一类算法,其思想多是受到自然界各种现象的启发,模拟不同的物理 或者生物学现象,特点是能够在较大范围内广泛搜索并找到全局最优解。该两类 算法的优劣列表如下:

表 2-1 基于梯度的优化算法和随机搜索算法优劣对比

Table2-1 Comparison between gradient-based optimization algorithms and stochastic searching optimization algorithms

由此,可以看出,基于梯度的优化算法和随机搜索的优化算法各自的优劣非 常明显。尽管对于部分优化问题,设计者只需要找到一个"更优"的解,亦即只需 要通过基于梯度的优化算法快速找到这样的设计,但是对于大多数问题而言,设 计者们更希望得到的是一个"最优"的解,即在设计空间内性能最佳的设计。正 是基于这样的需要,随机搜索的优化算法才备受关注。然而,由于随机搜索算法 有着天然的迭代次数多、效率较低、难以收敛的特点,加上本文涉及到的水动力 性能求解模块本身的计算耗时较长,因此这一矛盾就尤为突出。

近似模型技术正是出于要解决这一矛盾,而逐渐受到研究者关注的课题。在 一次船型优化设计中,由于随机搜索优化算法的采用,优化过程可能要考量数万 甚至更多个不同的船型,加上目标函数的复杂性,水动力性能评估模块可能会被 调用十万次以上。尽管对于一些可以依靠数学或经验公式求解的问题,这样的直 接模拟不会带来严重的问题,但是对于复杂的水动力问题,尤其是船舶与海洋工 程中涉及到的粘性、波浪甚至操纵性问题,通过经验公式等方法来实现优化设计 就显得力不从心了,这样的方法很难捕捉到敏感的形状变化带来的性能变化,也 可能带来不符合物理事实的误差,这样的误差导致的结果就是:优化过程中增加 的计算成本并不能真正增加最终优化结果的精确性,甚至会得到相反的结果。正 因如此,一种调和性能预报和优化算法的技术显得尤为重要。



图 2-1 引入近似模型的船型优化流程 Fig.2-1 Flow chart of shape optimization design coupled with approximation model

既然精度更高的数值模拟技术耗时会大大增加,而出于精度的考虑又不得不 采用,能够大幅降低计算成本的近似模型技术就可以较好的解决这一矛盾。类似 于朴素的"拟合"方法,近似模型技术也是一种基于样本点和函数值,构造"黑 箱"模型的方法,后者的复杂之处在于,它考虑了更科学的样本点布置方式,称 之为"试验设计(Design of Experiement)",同时采用了更精确的建模技术,称之 为"近似模型构建技术(Approximation Model Construction)"。

本章的主要内容和目的就是深入探讨优化算法和近似模型技术两大话题,通 过对不同的算法和模型的研究,分析各类方法的优劣,并对后文采用的优化算法 和近似模型技术进行实现和验证。

#### 2.2 优化算法

本节将介绍基于梯度的局部优化算法和随机搜索的全局优化算法。其中,基 于梯度的局部优化算法中,主要介绍序列线性规划和序列二次规划算法。随机搜 索的全局优化算法中,主要介绍单目标、多目标遗传算法,粒子群算法以及模拟 退火算法。

#### 2.2.1 基于梯度的局部优化算法

对于数值优化问题,基于梯度的优化算法是最为基础和常用的方法。因此, 本文首先介绍两种最为常见的算法:处理线性规划问题的单纯形法和处理非线性 约束问题的序列二次规划算法。

#### 2.2.1.1 单纯形法(Simplex method)

在数值优化理论中,单纯形法是用来求解线性规划问题的普遍流行的方法<sup>[38-42]</sup>。它是由美国运筹学家 George Bernard Dantzig 首先提出的。

单纯形法的思想是一种迭代思想,其基本流程是:先找出一个线性规划问题 中设计空间内的可行解,然后基于该解,按照一定的规则找到另一个更好的解, 上述过程反复迭代,直到最终找到一个最优解。

#### 2.2.1.2 序列二次规划算法(Sequential quadratic programming algorithm)

序列二次规划方法是一种高效的、基于梯度的局部优化策略,该方法由 R.B.Wilson 在 1963 年提出的 Newton-Lagrange 方法演化而来。其在工程上已经有 诸多应用。其基本思想是:通过在迭代点处构造一个二次规划(Quadratic Programming,QP)子问题,近似替代原先的约束优化问题,求解该子问题以获得 一个更好的迭代点,不断迭代的过程将得到最终的收敛解。

该算法由于计算效率高、可以考虑线性和非线性约束,因而适合在船型优化 设计中应用,本论文首先利用 Matlab 中的 fmincon 函数调用该优化算法,结合自 主开发的 NMShip-SJTU 构建了基本的船型优化框架。

#### 2.2.2 随机搜索的全局优化算法

由于本文的研究主要是针对船舶水动力性能的优化,而这一问题很难用一般的数学公式表达,其最优化问题也变得尤为复杂。正因如此,上述基于梯度的局部优化方法虽然能找到一个比当前设计更优的设计,但是很难找到一个全局范围内最优的设计。另一方面,目前包括船舶工程在内的许多工程科学已经迅速发展,船体型线也被不断优化改进,因此船体型线设计就更难在局部找到更好的设计。 本文对优化算法的研究应当更多关注随机搜索的全局优化算法。 这类优化算法又可以称为启发式搜索算法,因为它们多是模拟了一些符合自 然界规律的物理学或者生物学过程,在搜索的过程中受到全局信息的启发,因而 变得更加智能和有效。

#### 2.2.2.1 模拟退火算法(Simulated Annealing)

模拟退火算法是由 Metropolis 提出的最早的随机优化算法<sup>[5,43]</sup>,其提出受到了 统计热力学中热平衡问题的启发,将高温物体退火的过程模拟出来,从而找到化 问题的全局最优解。它是一种基于概率的算法,在迭代过程中,既会出现可以是 目标函数值变优的"更好的"点,也有概率出现"更差的"点,是否接受"更差的"的点, 取决于当前温度下的接受概率。随着温度的下降,接受概率也逐渐下降,该概率 准则也被成为 Metropolis 准则:

$$p = \begin{cases} 1 & E(x_{new}) < E(x_{old}) \\ exp(-\frac{E(x_{new}) - E(x_{old})}{T}) & E(x_{new}) \ge E(x_{old}) \end{cases}$$
(2-1)

该算法可以有效避免陷入局部最优解的情况。在许多工程问题中都已被广泛的应用,对于上述 Metropolis 准则,也有更多替代和改进的措施。

#### 2.2.2.2 单目标遗传算法

一方面,由于基于梯度的局部优化策略很容易落入到局部最优解当中。另一 方面,船体型线被不断优化改进,也就更难在局部找到更好的设计。因此,有效 的全局优化算法急需被应用于船体线优化设计。作为最为成熟的全局优化算法之 一,遗传算法已经被成功应用于许多工程优化问题。因此,本节首先使用 C++语 言开发了一种具有交叉和突变的单目标单遗传算法。并测试了其收敛性和可靠性。

遗传算法是受到生物进化理论和遗传学理论的启发而提出的,在遗传算法中 模拟了自然界生物进化的过程和机制。参考借鉴了自然界的自然选择规律和交叉 遗传规律,同时具备自然界随机性的特点,是一种人工智能的随机搜索优化算法。

下面介绍遗传算法的基本流程:遗传算法是用个体的"基因"(优化变量经过 编码后的形式)表示所求问题的一个可行解,在产生由一群单独的个体组成的一 代种群之后,每个个体将依次被检验其性能(优劣),并赋予其个体一定的适应度 值。性能越优秀的个体,其基因被遗传给下一代的概率就越大。父代种群中的优 势个体经过变异、或者杂交的随机变换后将会产生数目相同的子代。这样的过程 被称为一次遗传。经历若干次遗传之后,算法将收敛到若干个性能最优的个体, 这样的个体往往对应着问题的最优可行解,该流程如图 2-2 所示。



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

为了确保优化程序的可靠性,我们针对该算法程序进行了测试验证。一个具 有较高复杂度的二维多峰函数被选为测试函数,即基于单目标遗传算法处理纯数 值的函数优化问题。该函数表达式为:

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

该函数被称为 Alckley 函数,是一个具有非线性、对称性,且不可分离的多峰 函数,它有许多局部最小值,但其只在点(0,0)处取得全局最小值0。该函数几 何特征如图 2-3。







图 2-4 展示了本文实现的遗传算法程序处理 Alckley 函数最小值的优化迭代 历程,即搜寻可行域内最小函数值点的过程。本验证实例采用的交叉率为 0.85, 变异率为 0.05,每代种群的个体数为 200,遗传终止条件为遗传代数达到 100 或 个体误差小于 10<sup>-6</sup>。经过 52 代遗传,达到收敛条件,最终 x,y都收敛于 0.00488759, 函数值收敛到 0.0289106。本测试函数的优化结果较为理想。由此观之,本论文中 使用的遗传算法是正确可靠的。这是完成船型优化流程的有力保障。

#### 2.2.2.3 多目标遗传算法

遗传算法被提出之后,一直到上世纪 90 年代,该算法才真正被应用到多目标 优化问题中,基于 Pareto 序列的多目标遗传算法成为研究的重点,还有一些学者 提出了不基于 Pareto 序列的遗传算法,也受到一定关注。第一个所谓的多目标遗 传算法于 1985 年被 David Schaffer 提出,被称为基于向量评估的遗传算法,该算 法并不是真正意义上的多目标遗传算法,它只能收敛于某一区域,无法得到完整 的非支配解集。真正意义上可以获得非支配解集的多目标优化算法是 1995 年由 Srinivas 和 Deb 提出的,他被称为非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic algorithms,NSGA),该算法是根据个体之间两两的支配关系排序完成目标 函数赋值的。尽管该方法在提出之初,存在包括计算复杂度高、缺乏精英策略等 实际问题,却也获得了广泛的应用。2000 年,Deb 本人对 NSGA 方法存在的问题 做出了改进,提出了 NSGA-II,该方法获得了巨大的成功,成为当前应用最为广 泛的多目标遗传算法。

在实际的船舶型线设计的过程中,其设计目标不可能是单个目标,而是要综 合考虑包括水动力学、结构布置等许多方面的问题。正因如此,基于多目标优化 算法的船体型线设计就显得格外重要。本文在单目标遗传算法的程序基础上,引 入基于帕累托(Pareto)解排序的思想,进一步开发了多目标遗传算法 NSGA 和 NSGA-II 算法程序。

NSGA 算法最基本的思想就是将所有个体按照非支配序列排序,并依此赋予 其适应度函数值,此操作被称为"非劣分层"。在 NSGA 中,为了保证群体的多样 性,引入了共享函数法,计算个体之间的距离,并依此避免陷入遗传算法非多样 性的弊端。

然而,NSGA 依然存在诸如计算复杂度高、缺乏精英策略等实际问题,NSGA-II 的提出有效改善了这些问题,其主要思想就是引入了更好的记帐策略,减少运 行时间,同时采用密度估计操作算子来估计个体周围群体密度,但避免了小生境 参数,引进精英策略,避免了优良个体被丢弃的危险。因此成为了目前最流行、 最可靠的多目标遗传算法。本论文采用该算法,对一数值测试函数进行了试验, 结果如图 2-5 所示,该函数由 NSGA 和 NSGA-II 的提出者 Deb 给出:

$$minf_1(x) = x_1$$

$$\min f_2(x) = g * h$$

$$g = 1 + 10(n-1) + \sum_{i=2}^n (x_i^2 - 10\cos(4\pi x_i))$$

$$h = 1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g}}$$
(2-3)





从以上数值验证结果看来,本论文采用的多目标遗传算法是可靠的,可以用 于船体型线优化设计当中。

#### 2.2.2.4 粒子群算法

粒子群优化算法是和多目标优化算法同期产生的,Eberhart和Kennedy1995年 根据鸟群的捕食行为发展了该算法。在粒子群算法中,有着与其他进化类算法相 似的群体、个体和进化概念,不同之处在于,每个个体被看做是一个没有重量和 体积的飞行粒子,总是以一定方式,向个体的最优位置和群体最优位置处聚集, 从而实现个体进化。

粒子群算法和遗传算法相比,有着各自的优势和特点。在处理实际问题的过程中,粒子群算法的参数选择也对其优化效率和结果有着明显的影响。

#### 2.3 近似模型技术

由于高精度的数值模拟计算需要大量的计算成本,很难直接应用到优化过程 中来,结合近似模型技术的优化设计越来越受到重视,并取得了很多应用<sup>[45]</sup>。本 文所述的近似模型技术即是结合了试验设计和近似模型构建的完整过程,下面对 其方法分别进行阐述。

#### 2.3.1 试验设计方法

试验设计方法是为了降低数值模拟的计算成本、同时尽量保证样本群体的精 度,从数理统计学的角度确定试验设计方案的一种方法。

本文采用的试验设计方法为优化拉丁方试验设计方法,如图 2-6 所示。图中 展示了均匀分布、随机拉丁方设计和优化拉丁方设计三种试验设计方法。可以看 出,优化拉丁方试验设计方法的正交性和均匀性都更优秀,这样的试验设计方法 将会大大减少近似模型的样本点数量,同时有助于提高近似模型的精度。



#### 2.3.2 近似模型构建技术

本节的近似模型构建技术包括响应面近似模型和克里金近似模型。

#### 2.3.2.1 响应面近似模型

响应面方法也成为多项式回归法,它是基于最小二乘法的原理,对任意函数 进行近似构造的一种方法。该方法的主要特点是速度快、编程简单,对低阶非线 性问题的拟合精度很高。

首先,可以将响应面近似模型表达式写成如下形式:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N} a_i \varphi_i(t) \tag{2-4}$$

其中, $\varphi_i(t)$ 是响应面模型基函数, $t \in [t^L, t^U]$ 是设计空间中的设计变量。基函数可以是任意阶,一般情况下,只使用一阶或二阶基函数:

$$\varphi_i(t) = 1, x_1, x_2, \dots, x_n$$
 (2-5)

$$\varphi_i(t) = 1, x_1, x_2, \dots, x_n, x_1 x_2, \dots, x_{n-1} x_n, \dots, x_n^2$$
 (2-6)

为了构建近似模型, 需要通过试验设计选取 P(P>N) 个设计空间中的样本点t<sub>j</sub> (*j*=1,2,...,*P*)

这样,就可以得到数值试验的 P 个真值,构成了真值矩阵  $\tilde{y} = (\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, ..., \tilde{y}_p)^T$ 近似模型与真值的误差可以表示为:

$$e_{j} = \tilde{y}_{j} - y_{j} = \tilde{y}_{j} - \sum_{i=1}^{N} a_{i} \varphi_{i}\left(t_{j}\right)$$

$$(2-7)$$

对上式求平方和,并利用最小二乘法的原理,即可得到系数矩阵:

$$E = \sum_{j=1}^{P} e_j^{\ 2} = \sum_{j=1}^{P} \left( \tilde{y}_j - \sum_{i=1}^{N} a_i \varphi_i \left( t_j \right) \right)^2$$
(2-8)

$$A = \left(\phi^T \phi\right)^{-1} \left(\phi^T \tilde{y}\right) \tag{2-9}$$

其中:  $\phi = \begin{bmatrix} \varphi_1 t_1 & \cdots & \varphi_N t_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_1 t_P & \cdots & \varphi_N t_P \end{bmatrix}$ 

对于该近似模型的拟合精度,还可以通过方差分析进行判断:

$$R^{2} = \frac{\sum_{j=1}^{P} (y_{j} - \overline{y}_{j})^{2}}{\sum_{j=1}^{P} (\tilde{y}_{j} - \overline{y}_{j})^{2}}$$
(2-10)

R<sup>2</sup> 越接近 1, 其拟合精度越高。

#### 2.3.2.2 克里金近似模型

克里金模型的形式如下:

$$y(x) = f(x) + z(x)$$
 (2-11)

$$Cov[z(x_i), z(x_j)] = \sigma^2 R[R(x_i, x_j)] \ 1 \le i, j \le n$$
(2-12)

式中, y(x)是所求未知函数, f(x)是确定性多项式函数, 是对设计空间的全局近似, 多数情况下, f(x)可以用一个常数 $\beta$ 表示; z(x)是一个正态分布高斯随机过程, 其均值为零, 方差为 $\sigma^2$ , 协方差非零, 其函数为:

式中 R ——相关矩阵;

 $n_s \times n_s$  ——对称正定对角矩阵 ( $n_s$  表示样本点个数);  $R(x_i, x_j)$ ——任意两个样本点  $x_i$  和  $x_j$  之间的相关函数。 最常用的高斯相关函数形式如下:

 $R(x_{i}, x_{j}) = \prod_{k=1}^{n_{dv}} \exp(-\theta_{k} |x_{k}^{i} - x_{k}^{j}|^{2})$ (2-12)

式中 k——设计变量个数;

 $\theta_k$ ——拟合模型的未知相关参数;

 $x_k^i - x_k^j - \cdots - x_i$ 和 $x_j$ 第k个元素的距离。

相关函数确定以后,就可以建立y(x)的近似响应 $\hat{y}(x)$ 关于观测点x的表达式。 形式如下:

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + r^T(x)R^{-1}(y - F\hat{\beta})$$
 (2-13)

式中 *v* — — *n*<sub>s</sub> 维列向量,包含每个设计点上的目标响应值;

 $F - - n_s$ 维列向量, 当 f(x)为一个常数时简化为单位列向量;

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

$$r^{T}(x) = [R(x, x_{1}), R(x, x_{2}), \dots, R(x, x_{n_{s}})]^{T}$$
(2-14)

f(x)假定为一常数为 $\hat{\beta}$ 由下式估计,即

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \left(\boldsymbol{F}^{T}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{F}\right)\boldsymbol{F}^{T}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{y}$$
(2-15)

*ô*<sup>2</sup>是方差的估计,是基于所求得的全局近似模型的样本点响应的方差,并不 是观测的样本点响应的方差,其表达式如下:

$$\hat{\sigma}^{2} = \frac{(y - F\hat{\beta})^{T} R^{-1} (y - F\hat{\beta})}{n_{s}}$$
(2-16)

相关参数 $\theta_k$ 的最大似然估计通过对下式取极值得到, $\theta_k > 0$ :

$$\max_{\theta_k>0} -\frac{n_s \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln(\det R)}{2}$$
(2-17)
其中 $\hat{\sigma}^2$ 和detR都是 $\theta_k$ 的函数,任何一组 $\theta_k$ 都能构成一个迭代近似模型,最优拟合的克里金模型可以通过求解上式所描述的k维非线性无约束优化问题。

克里金模型具有较好的适应性,可以广泛用于对低阶和高阶非线性问题的拟 合,但也存在拟合效率较低等问题。

## 2.4 本章小结

本章主要从优化算法和近似模型技术的角度,分别对不同的优化算法和近似 模型技术做了详细介绍和分析,对不同方法的优缺点做了深入探讨,并对本文重 点实现的单目标遗传算法和多目标遗传算法的流程进行了细致介绍。同时对实现 的单目标和多目标遗传算法的程序都进行了验证,保证了后续工作的可靠性。

# 第三章 船型变换与水动力性能预报

## 3.1 引言

船型变换模块和数值计算模块,都是船体型线优化过程的重要组成部分,船 型变换是连接型线设计参数与实际船型的桥梁,数值计算则建立了船型与其对应 水动力性能的关系。这两者结合在一起,就可以建立完整的型线设计参数与水动 力性能的直接关系,表示成数学形式如下:

$$y_{j,j\in[1,N]} = f(x_{design}) \tag{3-1}$$

其中, $y_{j,j\in[1,N]}$ 表示包括水动力性能在内的船舶各类性能, $x_{design}$ 表示船体的型线设计参数,而函数关系  $f(x_{design})$ 则代表了从船体型线设计到船舶性能的映射关系。

本章的内容和目的在于建立上述映射关系,即通过船型变换和水动力性能评估两大模块的结合,建立每组船型设计参数与其对应船型水动力性能的映射关系。

## 3.2 船型变换模块

船型变换模块是船型优化流程中的关键一环。每当设计优化变量重新取值后, 该模块将产生一个新船型,并送交船舶水动力性能评估模块进行求解评估,评估 结果将进一步影响优化模块对设计变量的下一次搜索。

本节将对 OPTShip-SJTU 以及本文涉及到的船型变换方法做简单介绍。

#### 3.2.1 平移法

平移法(Shifting Method)是一种简单易行的参数化建模方法。它以船体横剖 面面积曲线(Section Area Curves, SAC)为操作对象,通过引入修改函数来对船 体横剖面面积曲线进行修改,又通过沿船长方向有序平移各站位型线得到新的几 何变换船型。



Fig.3-1 Sketch for shifting method

为了使全船实现连续协调变换,我们引入修改函数 g:

$$g = \begin{cases} \alpha_{1} \left[ 0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_{2}}{\alpha_{2} - x_{1}}) \right]^{0.5}, & x_{1} \le x \le \alpha_{2} \\ -\alpha_{1} \left[ 0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_{2}}{\alpha_{2} - x_{2}}) \right]^{0.5}, & \alpha_{2} \le x \le x_{2} \end{cases}$$
(3-2)

其中涉及四个变量: x1, x2分别为船体曲面变换区域的起始位置, a1 为变换的最大幅度, a2 为变换区域内不动点的位置。

平移法的特点是设计变量少,变换效率高,非常适用于对大范围内曲面(全船、半船)的整体修改。并且该方法可以有效确保新生成船型的光顺性。

#### 3.2.2 径向基函数法

为了实现船体曲面的局部变换,有必要采用新的船型变换方法,国内外的学 者对此都开展了一些尝试。其中,Boer<sup>[46]</sup>介绍了一种基于径向基函数的曲面网格 变形方法,该方法在处理网格变形时简单有效,因此受到优化研究者的关注。本 文在进行船体局部变形时,首先将整个船体曲面离散成若干三角形面元,利用三 角形面元的节点位移,控制整个船体曲面的变形。由于需要有针对性的考察船体 某些特殊位置(如首柱、球鼻首、船尾等),同时为了避免整个船体由于局部变形 受到的影响,整个船体曲面的节点被划分为三类:

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

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

$$s(X) = \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \phi(\|X - X_j\|) + p(X)$$
(3-3)

上式中, *s*(**X**)被表示为*N*个径向基函数与一个多项式函数的和,其中,*N*是 所有控制点的个数,包括固定控制点和移动控制点,**X**<sub>j</sub> =(*x<sub>j</sub>*,*y<sub>j</sub>*,*z<sub>j</sub>*)表示每个径向基 函数的中心,也就是*N*个控制点的坐标,基函数*Φ*是空间中任一点**X**与函数中心 **X**<sub>j</sub>的欧氏距离的函数,本文选择如下具有紧支性的 Wedndland's 基函数:

$$\phi(\|X\|) = (1 - \|X\|)^4 (4\|X\| + 1)$$
(3-4)

p为低阶多项式:

$$p(X) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 z$$
(3-5)

系数 λ<sub>i</sub> 以及 c<sub>i</sub> 可以通过两类控制点的位移求解得到:

$$s(X_j) = f_j$$
,  $j = 1, 2, ..., N$  (3-6)

上式中, fj表示每个控制点的位移值, 同时附加条件:

$$\sum_{j=1}^{N} \lambda_{j} p(X_{j}) = 0 \quad , \quad j = 1, 2, \dots, N$$
(3-7)

可以得到如下线性方程组:

$$\begin{pmatrix} f \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M & P \\ P^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ c \end{pmatrix}$$
(3-8)

其中,

$$\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N]^T; \quad c = [c_1, c_2, c_3, c_4]^T; \quad f = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T; \quad (3-9)$$

$$M_{i,j} = \phi(||X_i - X_j||) \quad , \quad i, j = 1, 2, \dots, N$$
(3-10)

$$P_{i,j} = p_j(X_i)$$
,  $i = 1, 2, ..., N$ ,  $j = 1, 2, 3, 4$  (3-11)

至此,我们只需求解线性方程组(3-8),即可得到式(3-3)中的各个系数,并将 所有网格节点坐标代入(3-3),就可以得到所有网格节点的变形情况,从而完成船 型变换。该方法将船体表面的部分网格节点位置作为优化变量,通过基于径向基 函数的插值方法求解控制节点之外其他节点的位移。该方法变化灵活,设计变量 直观,能适应对整体或局部曲面的变形,且变形易于控制,因此已经取得了诸多 应用。

## 3.2.3 自由变换方法

FFD 方法是由 Sederberg 和 Parry<sup>[47]</sup>在 1986 年提出的一种网格自由变形方法。 它已经被广泛应用于包括船舶几何重构在内的各个领域。其基本思想是:

- 1)首先选定一个格子(Lattice),格子的大小与位置确定了待变形区域的大小 与位置,并将待变形物体(母型船)嵌入这个格子;
- 2) 在格子内选定一系列控制点,并通过 Bernstein 多项式建立船体表面点坐标与控制点坐标间的线性关系;

以部分控制点位移量为设计优化变量,通过移动控制点位置,将格子的变形 传递给内部目标(母船),从而实现船体曲面变形。

首先,在一个包含需要进行变形的物体的长方体中构造局部坐标系 O'-STU, 该局部坐标系如图 3-2 所示:



图 3-2 FFD 方法局部坐标系 Fig. 3-2 Local system of FFD method

其中 O'为局部坐标系的原点, S, T, U 为局部坐标系下沿三个坐标轴的轴矢量。 易知,如笛卡尔坐标系 O-XYZ 下的任一点 X 在局部坐标系中的坐标为(*s*, *t*, *u*),则有:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + s\mathbf{S} + t\mathbf{T} + u\mathbf{U} \tag{3-12}$$

其中 X<sub>0</sub>为局部坐标系中的原点, s, t, u 分别可表示为:

$$s = \frac{T \times U(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{T \times U \cdot S}, \ t = \frac{S \times U(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{S \times U \cdot T}, \ s = \frac{S \times T(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{S \times T \cdot U}$$
(3-13)

显然 s, t, u 的取值均介于 0 和 1 之间。

在长方体内构造控制顶点 *Q*<sub>*i,j,k*</sub> : 分别沿 *S*, *T*, *U* 三个方向用平行于 *O'TU*, *O'SU*, *O'ST* 面的等距截面将 *O'S*, *O'T*, *O'U*等分为 *l*, *m*, *n* 个区间,则 *Q*<sub>*i,j,k*</sub> 可表示为:

$$Q_{i,j,k} = O' + \frac{i}{l} S + \frac{j}{m} T + \frac{k}{n} U$$
  
(3-14)  
 $i = 0,1,\cdots l; \quad j = 0,1,\cdots m; \quad k = 0,1,\cdots n;$ 

这样,框架内任意一点的笛卡尔坐标 X 可以表示为:

$$\mathbf{X}(s,t,u) = \sum_{i=0}^{l} \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=0}^{n} B_{i,j}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) Q_{i,j,k}$$
(3-15)

其中B代表 Bernstein 多项式基函数,定义为:

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^{i} (1-u)^{n-i}$$
(3-16)

由(2-14)式可知,初始船型网格节点是所有控制节点的线性函数。在建立了船的几何点与框架之间的关系后,我们将以部分控制节点的位置作为设计优化变量,通过控制框架的变形来达到船型变换的目标。将控制框架内的任一点 X 的初始局部坐标为(*s*,*t*,*u*),控制节点 *Q*<sub>*i*,*i*,*k*</sub> 的位置变化后得到新的控制节点 *Q*'*i*,*i*,*k*,则点 X 也将移动到点 X<sub>ff</sub>:

$$\mathbf{X}_{ffd} = \sum_{i=0}^{l} \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=0}^{n} B_{i,j}(s) B_{j,m}(t) B_{k,n}(u) Q'_{i,j,k}$$
(3-17)

改变控制节点的移动数量,方向,大小,即可得到不同的新船体网格。

### 3.3 水动力性能数值预报模块

#### 3.3.1 基于 Neumann-Michell 理论的兴波阻力预报

为了实现快速而准确的船体型线优化设计,很多学者尝试了各种不同的水动 力性能评估手段。本文采用的是由 Francis Noblesse 等学者提出的 Neumann-Michell (NM)理论<sup>[48]</sup>,该理论是在 Neumann-Kelvin (NK)理论的基础上发展而来的。 该理论的成功之处在于: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。基于 NM 理论的阻力预报效率 非常高,同时也具有一定的精度,因此非常适用于船型优化<sup>[49-51]</sup>。

NM 理论的最终表达式为:

$$\tilde{\phi} = \tilde{\phi}_H + \tilde{\psi}^W \tag{3-18}$$

上式中:

$$\tilde{\phi}_{H} \equiv \int_{\Sigma^{H}} G \, n^{x} \, da - \int_{\Sigma^{F}} G \, \pi^{\phi} \, dx dy \tag{3-19}$$

$$\tilde{\psi}^{W} = \int_{S^{H}} (\phi_{i} \mathbf{d}_{*} + \phi_{d'} \mathbf{t}_{*}) \cdot \mathbf{W} da$$
(3-20)

其中 $\mathbf{d}_*$ ,  $\mathbf{t}_i$ , t', d'均是与船体相切的单位向量, 波浪函数 $\mathbf{W} \subseteq W$ 满足  $\nabla \times \mathbf{W} = \nabla W$ 关系。

本文采用基于 NM 理论的求解器 NMShip-SJTU 来预报船体兴波阻力,为了 验证这一求解器的可靠性,我们对数学船型 Wigley 船在不同傅汝德数(Froude Number, Fr)下的兴波阻力进行了计算测试,并以 1957ITTC 公式计算相应的摩 擦阻力,进一步将两者之和近似作为船体总阻力。NMShip-SJTU 求解器的所有计 算结果均与船模试验值进行比较。如图 3-3 所示。

由图 3-3 可知,与试验值相比,基于 NM 理论对 Wigley 船阻力的预报精度可以达到±10%。尽管与其他高精度的阻力预报方法相比,这样的结果并不是最突出。但对于船型优化而言,该误差是可以接受的。



图 3-3 NM 预报总阻力系数与试验值的比较 Fig. 3-3 Comparion of resistance coefficient predicted by NM theory and experiment data

### 3.3.2 基于 RANS 的水动力性能综合预报

为了进行更加精细的船舶水动力性能预报,本论文将采用自主开发的 RANS 船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行基于 CFD 的船体型线优化设计, naoe-FOAM-SJTU 包含六自由度运动模块和数值造波模块,可以准确预报船舶水动力性能,包括快速性、耐波性、操纵性,并可以给出船舶航行过程中的流场特征。其可靠性和准确性已在很多研究中[52-54]得到验证。





图 3-4 naoe-FOAM-SJTU 程序框架 Fig. 3-4 Framework of naoe-FOAM-SJTU program

在此基础上,本论文开发了一套基于船体表面网格变形的 CFD 船体型线优化 流程。通过全自动化的网格生成工具 snappyHexMesh,实现了自动完成船舶水动 力性能 CFD 评估,并依此实现近似模型的构建。这为第五章中基于 RANS 方法进 行的船体型线优化设计工作打下了基础。

# 3.4 本章小结

本章介绍了本文涉及到的 OPTShip-SJTU 采用的船型变换模块和水动力性能 评估模块,这两个模块均是船型优化过程中不可或缺的模块。对船型变换和水动 力性能评估的开发应用也是船型优化需要考虑的重要问题。

# 第四章 基于不同优化算法的船型优化实例

# 4.1 引言

第二、第三两章已经介绍了本文船型优化涉及到的优化算法、近似模型技术、 船型变换方法和水动力性能预报方法。并对各类算法进行了验证分析,确保其有 效性和可靠性。

本章将在此两章内容的基础上,完成两个船型优化的实例。本章优化研究的 对象均为 Series60 标准船型,分别采用序列二次规划和单目标遗传算法,对单个 目标函数(给定单个航速下的船舶快速性),进行了优化设计。每个优化实例都考 虑了船体的整体和局部变形。为了提高优化设计的效率,本章采用的是基于 Neumann-Michell 理论的 NMShip-SJTU 求解器预报船舶兴波阻力。

## 4.2 基于序列二次规划的 Series 60 船型优化设计

作为本文第一个优化实例,本节选择了效率较高的基于梯度的优化算法和较 为简单的标准船型为母型船。

本优化实例以兴波阻力最小为优化的目标函数,对标准船型 Series 60 进行优化设计。Series 60 是一种常见的标准船型,其水动力学性能得到了许多实验和数值计算的验证和研究<sup>[55]</sup>。



图 4-1 Series 60 船型模型(水下部分) Fig.4-1 Model of Series 60 Hull (Underwater section)

本节涉及到的船型变换方法有平移法和径向基函数法,水动力性能评估采用 基于 Neumann-Michell 理论的 NMShip-SJTU 求解器,优化算法采用序列二次规划 算法,经过优化迭代后,得到了指定傅汝德数下兴波阻力最小的优化船型,并对 优化结果进行了分析。 4.2.1 目标函数

本文的主要优化设计目标均为船舶的水动力性能。Neumann-Michell 理论恰好 提供了一种快速预报船舶兴波阻力的方法,因此本章的船型优化设计均以船舶兴 波阻力系数最小为优化目标。

本算例的船形设计优化的目标函数,即中等航速下 Serious60 标准模型的船舶 兴波阻力系数,可表示为式(4-1),本算例采用的优化算法是第二章介绍的序列二 次规划算法。需要注意的是,为了方便船型变换中各个变量的表示,本文将所涉 及船型均按照船长做归一化处理,因此计算过程中 Serious60 船长为 1m,其他船 型参数如表 4-1 所示。

$$f_{obj} = \min Rw, \quad Fr = 0.20$$
 (4-1)

表 4-1 Series 60 模型参数 Table 4-1 Parameters of Model Series 60

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

图 4-2 为 Series 60 船的表面网格,出于计算精度和效率两方面考虑,其在船 首和船尾曲率较大的位置均作了加密处理,同时在船中部分采用了较稀疏的网格。 同时为了得到自由面的兴波情况,建立了如图 4-3 的均匀加密的自由面网格。整 个计算以船体中纵剖面为对称面,对船体的一半模型进行数值求解,在后面的计 算中,也都是采用了这样的方法。



图 4-2 Series 60 船体表面网格 Fig. 4-2 Surface Mesh of Series 60 Hull



图 4-3 Series 60 船体表面网格及自由面网格 Fig. 4-1 Surface Mesh of Series 60 Hull and Mesh for Free Surface

#### 4.2.2 设计变量

本算例的 Series 60 船体型线优化设计是基于第三章中的两种船型变换方法: 平移法和径向基函数方法进行的,共有八个设计变量: α<sub>1</sub>f, α<sub>2</sub>f, α<sub>1</sub>a, α<sub>2</sub>a, *f*<sub>1</sub>, *f*<sub>2</sub>, *f*<sub>3</sub>, *f*<sub>4</sub>。 其中 α<sub>1</sub>f, α<sub>2</sub>f, α<sub>1</sub>a, α<sub>2</sub>a 分别为平移法所涉及的船型变换参数,下标 f 代表船体的前 半体, a 代表船体的后半体; *f*<sub>1</sub>, *j*=1, 2, 3, 4 则是代表基于径向基函数插值方法的船型 变换参数,分别为四个移动控制点的移动距离,这四个控制点控制点均位于船体 首柱位置,如图 4-4 所示,且其移动方向均为船长方向,其他方向保持固定。



图 4-4 基于径向基函数插值方法的四个移动控制点 Fig. 4-4 Four Shifting Control Grids of Radial Basis Function Interpolating Method

对于上述八个设计变量,其符号和单位,以及变换范围,总结如表 4-2 所示。

表 4-2 基于序列二次规划算法的 Series60 船型优化设计变量 Table 4-2 Design Variables of Ship Hull Optimization Design of Series60 based on SQP Algorithm

序号	符号	下限	上限	单位
1	$\alpha_{1\mathrm{f}}$	-0.005	0.005	/
2	$\alpha_{2f}$	0.1	0.4	m
3	$\alpha_{1a}$	-0.005	0.005	/

上海交通大学硕士学位论文

4	$\alpha_{2a}$	-0.54	-0.1	m
5	$\mathbf{f}_1$	-0.001	0.001	m
6	$f_2$	-0.001	0.001	m
7	$f_3$	-0.001	0.001	m
8	$f_4$	-0.001	0.001	m

## 4.2.3 优化结果

经过序列二次规划算法的 360 步迭代计算,该优化收敛到最终的目标函数最优解,将优化结果列表如下:

表 4-3 基于序列二次规划算法的 Series60 船型优化结果 Table 4-3 Results of Ship Hull Optimization Design of Series60 based on SQP Algorithm

	兴波阻力系数(×10-3)	湿表面积(m²)	排水体积(m³)
初始船型	0.3900084	3.40952	0.00424552
最优船型	0.2074481	3.40645	0.00424401
改变量	-46.81%	0.09%	-0.04%

从上表的优化结果来看,可以发现,得到的最优船型的兴波阻力系数,相比 初始的 Series 60 船型有接近一半的减低。与此同时,船型的湿表面积和排水体积, 变化量都在 0.1%以内,基本保持不变,这说明了该优化船型在保留了初始船型的 形状特征的基础上,通过整体和局部较小的形状变化,就取得了很好的减小兴波 阻力的效果。

为了对这一结果的合理性进一步进行研究,需要结合船体形状的具体变化和 船体表面压力、自由面兴波进行分析。

图 4-5 和图 4-6 是 Series 60 船型优化前后的型线对比。从图中可以看出,相 对于初始船型 Series 60,最优船型的船体首部和船体尾部都有变得更加肥大的趋势,而船体中部则变得更加短小和瘦削。



图 4-5 Series 60 船型优化结果-横向型线对比 Fig. 4-5 Design Optimization Results of Series 60 Hull – Comparison of Cross Hull Form



图 4-6 Series 60 船型优化结果-纵向型线对比 Fig. 4-5 Design Optimization Results of Series 60 Hull – Comparison of Longitudinal Hull Form

图 4-7 是船体表面压力分布的对比图,同时,由于本节的优化设计通过基于 径向基函数插值的方法在船体首部作了特殊的局部变形设计,而船体首部的高压 去正是影响兴波阻力的重要因素,因此我们将船体首部的压力分布放大如图 4-8 所示。从这两个对比图可以明显看出,船体表面压力分布有了较明显的变化,主 要集中在船体首部高压区和中部低压区的变化。其中船体首部高压区压力值减小 明显,而且高压区范围也有一定缩小。同时低压区的低压值也有明显变化。这都 是造成船体兴波阻力减小的原因。



图 4-7 Series 60 船型优化结果-表面压力分布对比

Fig. 4-7 Design Optimization Results of Series 60 Hull – Comparison of Pressure Distribution on Hull Surface

上海交通大学硕士学位论文



图 4-8 Series 60 船型优化结果-船体首部表面压力分布对比 Fig. 4-8 Design Optimization Results of Series 60 Hull – Comparison of Pressure Distribution on Hull Surface of Ship Bow

最后,我们对船体的自由面兴波情况和表面兴波高度也作了对比分析,图 4-9 为船体自由面兴波对比,图 4-10 为船体表面兴波高度对比。可以明显的看出, 船体自由面兴波幅值有很明显的降低,尤其是尾流场横波高度改善降低,同时, 散波也有明显减少。同时从船体表面兴波高度来看,其在船体首部和中部的兴波 都更趋平缓,恰好与前述的船体表面压力分布相吻合。

综上所述,对于 Series 60 船型及其优化船型的水动力性能分析表明,前述的 优化结果是符合其水动力性能的改善的,虽然这样的优化结果很难确保其最优性, 但确实可以得到一个更优的解,同时其高效的优化过程也非常适用于船体型线设 计的初级阶段。

上海交通大学硕士学位论文



Fig. 4-9 Design Optimization Results of Series 60 Hull – Comparison of Free Surface Wave



图 4-10 Series 60 船型优化结果-船体表面兴波高度对比 Fig. 4-10 Design Optimization Results of Series 60 Hull – Comparison of Wave Elevation on Ship Hull Surface

# 4.3 基于单目标遗传算法的 Series60 船型优化设计

上一节中,我们通过序列二次规划的方式,初步验证了本文采用的各类船型 变换方法和水动力性能评估方法的可行性,而对于真正的船型优化设计,我们希 望得到的是其在全局可行解中的最优设计。另一方面,兴波阻力在船舶中低航速下并不占主导作用,而在高航速下却是尤为重要的性能。

本优化实例是基于 Neumann-Michell 理论和遗传算法进行的,以标准船型 Series60 为初始模型船,利用平移法与径向基函数法修改船体曲面,将兴波阻力系 数作为优化设计的目标函数,对高航速(Fr=0.30)下的 Series60 船型进行型线优 化设计。最终得到一个能使其在给定航速下兴波阻力有效减小的优化船型,并对 得到的优化船型做了验证分析。

#### 4.3.1 目标函数

本节的主要优化设计目标仍为基于 Neumann-Michell 理论预报的船舶兴波阻力系数。

本算例的船形设计优化的目标函数,为高航速下 Serious60 标准模型的船舶兴 波阻力系数,可表示为式(4-2),本算例采用的优化算法是第二章介绍的单目标遗 传算法。初始模型船 Serious 60 船长同样归一化为 1m,其他船型参数如表 4-1 所示,优化设计计算过程中的网格仍然同图 4-2 和 4-3 所示。

$$f_{obj} = \min Rw, \quad Fr = 0.30$$
 (4-2)

本优化实例采用的遗传算法中一代种群的个体数量设置为 30,设置的终止条件为种群代数达到 36代,即共完成 1080 个个体计算,整理如表 4-4。

表 4-4 基于单目标遗传算法的 Series60 船型优化遗传算法设置 Table 4-4 Ship Hull Optimization Design of Series60 based on Genetic Algorithm – GA Settings

个体数量	种群代数	总迭代次数
30	36	1080

#### 4.3.2 设计变量

本算例的 Series 60 船体型线优化设计是基于第三章中的两种船型变换方法: 平移法和径向基函数方法进行的,共有九个设计变量: \alpha\_1, \alpha\_2, \alpha\_1, f\_2, f\_3, f\_4, f\_5。 其中 \alpha\_1f, \alpha\_2f, \alpha\_1a, \alpha\_2a, \delta, \delta\_3, \delta\_2a, \delta, \delta\_2, f\_1, f\_2, f\_3, f\_4, f\_5。 半体, a 代表船体的后半体; f\_{j, j=1, 2, 3, 4, 5}则是代表基于径向基函数插值方法的船型 变换参数,其中 f\_{j, j=1, 2, 3, 4} 分别为 1-4 四个移动控制点的移动距离,这四个控制点 控制点均位于船体首柱位置,如图 4-11 所示,且其移动方向均为船长方向,其他 方向保持固定。fs 表示控制点 5 的移动距离,其只沿船宽方向移动。



图 4-11 基于径向基函数插值方法的五个移动控制点 Fig. 4-11 Five Shifting Control Grids of Radial Basis Function Interpolating Method

对于上述九个设计变量,其符号和单位,以及变换范围,总结如表 4-5 所示。

序号	符号	下限	上限	单位
1	$\alpha_{1f}$	-0.005	0.005	/
2	$\alpha_{2f}$	0.1	0.4	m
3	$\alpha_{1a}$	-0.005	0.005	/
4	$\alpha_{2a}$	-0.54	-0.1	m
5	$\mathbf{f}_1$	-0.001	0.001	m
6	$f_2$	-0.001	0.001	m
7	$\mathbf{f}_3$	-0.001	0.001	m
8	$f_4$	-0.001	0.001	m
8	$f_5$	-0.001	0.001	m

表 4-5 基于单目标遗传算法的 Series60 船型优化设计变量 Table 4-5 Design Variables of Ship Hull Optimization Design of Series60 based on SGA

# 4.3.3 优化结果与分析

经过遗传算法的 36 代迭代,共计 1080 次计算,优化船型的兴波阻力系数基本收敛,兴波阻力系数迭代变化如图 4-12 所示,优化结果如表 4-6 所示:

表 4-6 基于单目标遗传算法的 Series60 船型优化结果 Table 4-6 Results of Ship Hull Optimization Design of Series60 based on SGA

	兴波阻力系数(×10-3)	湿表面积(m²)	排水体积(m³)
初始船型	2.00236	3.40952	0.00424552
最优船型	1.72281	3.40546	0.00424318
改变量	-13.96%	0.19%	-0.06%

从上表的优化结果来看,可以发现,得到的最优船型的兴波阻力系数,相比 初始的 Series 60 船型有约 14%的减低。与此同时,船型的湿表面积和排水体积, 变化量都在 0.2%以内,基本保持不变,这说明了该优化船型在保留了初始船型的 形状特征的基础上,通过整体和局部较小的形状变化,就取得了很好的减小兴波 阻力的效果。 为了对这一结果的合理性进一步进行研究,需要结合船体形状的具体变化和 船体表面压力、自由面兴波进行分析。

图 4-13 是 Series 60 船型优化前后的型线对比。从图中可以看出,类似于 4.2 节的优化结果,相对于初始船型 Series 60,最优船型的船体首部和船体尾部都有变得更加肥大的趋势,而船体中部则变得更加短小和瘦削,与此同时,注意到在本优化实例中,船体首部出现了一个明显的类似球鼻艏的结构,这一结果与船舶设计经验相符。



图 4-12 优化过程中的兴波阻力系数迭代 Fig. 4-12 Iteration Process of Wave Coefficient in Optimization Design





首先,我们对船体的自由面兴波情况和表面兴波高度作了对比分析,图 4-14 为船体表面兴波高度对比,图 4-15 为船体自由面兴波对比。可以明显的看出,船 体自由面兴波幅值有很明显的降低,散波和横波都有明显的减少。同时从船体表 面兴波高度来看,其在船体首部和中部的兴波高度都明显降低。



图 4-14 Series 60 基于遗传算法的船型优化结果-船体表面兴波高度对比 Fig. 4-14 GA-based Design Optimization Results of Series 60 Hull – Comparison of Wave Elevation on Ship Hull Surface



图 4-15 基于遗传算法的 Series 60 船型优化结果-船体自由面兴波对比 Fig. 4-15 GA-based Design Optimization Results of Series 60 Hull – Comparison of Free Surface Wave

图 4-16 是船体表面压力分布的对比图,同时,由于本节的优化设计通过基于 径向基函数插值的方法在船体首部作了特殊的局部变形设计,因此在船体首部出 现了可以降低兴波阻力的类似球鼻艏的结构。从这两个对比图可以明显看出,船 体表面压力分布有了较明显的变化,主要集中在船体首部高压区和中部低压区的 变化。其中船体首部高压区压力值减小明显,而且高压区范围也有一定缩小。同 时低压区的低压值也有明显变化。这都是造成船体兴波阻力减小的原因。

综上所述,基于单目标遗传算法的 Series 60 船体型线优化设计得到了有效、 合理的优化结果。

上海交通大学硕士学位论文



图 4-16 基于遗传算法的 Series 60 船型优化结果-表面压力分布对比 Fig. 4-16 GA-based Design Optimization Results of Series 60 Hull – Comparison of Pressure Distribution on Hull Surface

# 4.4 本章小结

本章在第二、三章对于优化算法、船型变换以及水动力性能评估的研究基础 上,对于 Series60 标准船型进行了优化设计,主要采用了基于梯度的序列二次规 划算法和随机搜索的遗传算法,两种方法的优缺点在这两个优化设计实例中均有 体现,同时也验证了本文采用方法的可行性,对程序的稳定性也做了测试。

# 第五章 结合近似模型的船型优化实例

# 5.1 引言

在前三章介绍的优化算法、近似模型技术、船型变换方法和水动力性能预报 方法基础上,以及第四章完成的两个船型优化实例,已经验证了本文采用的各类 算法的可行性,得到的优化结果也是合理、有效的。

本章将在此基础上,采用更为复杂的船型和优化算法,并结合近似模型技术, 对多个船型进行更大规模和多目标的优化设计。

本章的前两个实例中,将分别利用基于 Neumann-Michell 理论的 NMShip-SJTU 求解器和基于求解 RANS 方程的 naoe-FOAM-SJTU 求解器,结合遗传算法 与克里金近似模型,对 DTMB5415 船型分别进行船体型线优化设计。第三个优化 实例则是对 4250TEU 船型进行多个航速下的阻力优化。另外,在对 4250TEU 的 优化设计中,还采用了方差分析 (ANOVA)的方法,对不同设计变量的影响进行 了分析。

# 5.2 基于多目标遗传算法的 DTMB5415 船型优化设计

在实际的船舶型线设计的过程中,其设计目标不可能是单个目标,而是要综 合考虑包括水动力学、结构布置等许多方面的问题。正因如此,基于多目标优化 算法的船体型线设计就显得格外重要。本节将利用第二章介绍的多目标遗传算法, 结合两种船型变换方法:基于径向基函数插值的方法和自由变形方法,对水面战 斗舰艇模型 DTMB 5415 进行船体型线优化设计,DTMB 5415 模型如图 5-1 所示。 其特殊的球鼻艏(声呐罩)结构也是关系其水动力性能的重要因素,十分适合用 以研究局部变形对整体水动力性能的影响。



本节涉及的目标函数为多个航速下的船体兴波阻力系数。

5.2.1 目标函数

本节的多目标优化设计问题可以表示为以下数学形式:

 $\begin{aligned} \mathbf{Min} \ f([\mathbf{x}]) &= \left\{ f_{obj}^{1}, f_{obj}^{2}, f_{obj}^{3} \right\} \\ f_{obj}^{1} &= C_{w,1}, \quad at \ Fr = 0.20 \\ f_{obj}^{2} &= C_{w,2}, \quad at \ Fr = 0.30 \\ f_{obj}^{3} &= C_{w,3}, \quad at \ Fr = 0.40 \\ [\mathbf{x}] &= [\Delta_{1}, \Delta_{2}, \Delta_{3}, x_{1}, x_{2}, y_{1}] \end{aligned}$ (5-1)

其中,每个目标函数 f<sub>i</sub>(x) 都表示了在每个设计航速(Fr=0.20,0.30,0.40)下的 DTMB 5415船型的兴波阻力系数。本算例采用的优化算法是第二章介绍的多目标 遗传算法。初始模型船DTMB 5415船长同样归一化为1m,其他船型参数如表5-1所 示。

表 5-1 DTMB 5415 船型参数 Table 5-1 Parameters of DTMB 5415

船型	船长 L	船宽 B	吃水 D
DTMB 5415	1.00m	0.1342m	0.0433m

本优化实例采用的遗传算法中一代种群的个体数量设置为 200,设置的终止 条件为种群代数达到 200 代,即共完成 40000 个个体计算,整理如表 5-2。另外, 本优化实例采用了 100 个优化拉丁方设计的样本点和克里金模型来构造优化过程 需要的近似模型。

表 5-2 基于多目标遗传算法与克里金近似模型的 DTMB 5415 船型优化遗传算法设置 Table 5-2 Ship Hull Optimization Design of DTMB 5415 based on MOGA and Kriging Model - GA Settings

个体数量	种群代数	总迭代次数
200	200	40000

#### 5.2.2 设计变量

优化设计的设计变量是由船型变换方法决定的。本算例的 DTMB 5415 船体 型线优化设计是通过第三章中的两种船型变换方法:基于径向基函数插值的方法 和自由变形方法进行的,其中基于径向基函数插值的方法实现了船体球鼻艏(声 呐罩)处的局部变换,而自有变形方法实现了船体的前后半体和全船的整体变换。 该优化实例共有六个设计变量: Δ<sub>1</sub>,Δ<sub>2</sub>,Δ<sub>3</sub>,*x*<sub>1</sub>,*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>1</sub>。其中Δ<sub>1</sub>,Δ<sub>2</sub>,Δ<sub>3</sub>是代表基于 径向基函数插值方法的船型变换参数,三个移动控制点的位置如图 5-2 所示,1号 控制点只能沿着船体垂向移动,2号控制点只能沿着船体纵向移动,3号控制点只 能沿着船体横向移动。这样的设计也是为了更好地研究球鼻艏(声呐罩)三个方 向的尺寸变化对其兴波阻力的影响。*x*<sub>1</sub>,*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>1</sub>代表自由变换方法中三个自由变形的 长方体的变形量,其中两个分别包裹船舶前后半体的长方体只能沿船体纵向移动, 包裹整船的长方体只可以沿船体横向移动。为了约束船体变形的大小,防止过度 变形,本优化实例采用了不同于前面几个优化实例的方法,直接对船体主尺度进 行约束,如表 5-3 所示。



图 5-2 基于多目标遗传算法的 DTMB5415 船型优化设计变量 Fig 5-2 MGA based Ship hull modification settings with RBF and FFD method

几何约束条件	符号	变形量(%)
垂线间长	$L_{pp}$	0
船宽	В	0
吃水	Т	0
排水体积	$\nabla$	1.0
湿表面积	$S_{wet}$	1.0

表 5-3 基于多目标遗传算法的 DTMB5415 船型优化约束条件 Table 5-3 Design Constraints in MGA based Ship hull modification

## 5.2.3 优化结果与分析

#### 5.2.3.1 帕累托前沿和优选船型

在40000次优化迭代之后,得到了超过500个帕累托最优解,以三个目标函数 为坐标轴分别绘图如图5-3所示,形成的帕累托前沿十分明显,而这样的帕累托前 沿形态也表明其三个目标函数有着互相矛盾的趋势。同时,从中分别取出三个可 以使得目标函数达到最优的解和一个处于折中状态的解,将其标注于图5-3的帕累 托最优解集中。





将取出的四个优选船型,记为 Case-I, Case-II, Case-II, Case-IV。表 5-4 展示了它们和初始船型 DTMB 5415 的排水体积、湿表面积以及目标函数,即三个航速下的兴波阻力系数的对比情况。从表中可以看出,四个优选船型在不同航速下兴波阻力均有 5%以上的减低,而其排水体积变化量均小于 0.15%,湿表面积变化量则不超过 0.10%。

上海交通大学硕士学位论文

表 5-4 基于多目标遗传算法的 DTMB5415 船型优化结果-母型船和优选船型对比 Table 5-4 MOGA based DTMB 5415 hull optimization design results - Comparison of performances between original ship hull and selected cases

	母型船	Case-I	Case-II	Case-III	Case-IV
排水体积变化量	0	-0.14%	-0.07%	-0.13%	-0.07%
湿表面积变化量	0	-0.08%	-0.03%	-0.10%	-0.04%
$f_{obj}^1$ (变化量)	0.001169	0.001056(9 .67%)	0.001091(6.6 7%)	0.001092(6.5 9%)	0.001070(8.4 7%)
$f_{obj}^2$ (变化量)	0.001851	0.001688(8 .81%)	0.001603(13. 4%)	0.001633(11. 8%)	0.001631(11. 8%)
f <sup>3</sup> (变化量)	0.003305	0.003110(5 .90%)	0.003086(6.6 3%)	0.003027(8.4 1%)	0.003045(7.8 7%)

图5-4展示了该四个优选船型和母型船的型线对比情况,可以看出,四个优选船型的球鼻艏(声呐罩)在垂向均有明显提升,而在横向有一定缩小,同时在纵向有一定前移。特别明显的是,优选船型case-II在垂向的抬升最大,这也意味着在 Fr=0.30航速下,球鼻艏(声呐罩)的高度对于船体兴波阻力有更明显的影响。从 图5-4(e)的纵剖线对比来看,Case-IV的球鼻艏(声呐罩)比母型船有明显的增大。



图 5-4 基于多目标遗传算法的 DTMB5415 船型优化结果 - 优选船型(红色实线)与母型船 (黑色实线)的型线对比

Fig. 5-4 MOGA based DTMB 5415 hull optimization design results – Comparison of Hull Forms between selected cases (red line) and original hull (black line)

# 5.2.3.2 基于 RANS 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对优选船型 case-IV 的验证

为了检验该优化实例的有效性,分析优选船型在不同航速下的自由面兴波和 流场物理细节,同时验证其优化效果,本节采用 RANS 求解器 naoe-FOAM-SJTU 模拟了优选船型 Case-IV 在三个设计航速下的静水航行。其在三个设计航速下的 自由面兴波情况如图 5-5 所示。



图 5-5 naoe-FOAM-SJTU 预报的优选船型 Case-IV 在三个设计航速下自由面兴波与母型船的 对比 Fig. 5-5 Comparison of wave pattern between original hull and Case-IV predicted by naoe-FOAM-

SJTU

从图 5-5 可以看出, 三个设计航速下, 优选船型 Case-IV 的自由面兴波相比母型船都有一定减缓的趋势, 尤其是其船尾附近的兴波, 波峰和波谷的幅值都有一定减低, 而从整个尾流场来看, 其散波也有一定减弱。这也说明该优选船型在三个航速下的兴波阻力性能更优的合理性。

## 5.3 结合 RANS 求解器的 DTMB 5415 船型优化设计

由于近似模型的引入,使得基于更高精度求解器预报水动力性能的船型优化 设计成为可能。本节将在上节船型优化实例的基础上,探索基于 RANS 方程的 naoe-FOAM-SJTU 求解器实现船舶总阻力优化的问题。出于计算成本的考虑,本 节将问题简化为单目标优化问题。

5.3.1 目标函数

本节的多目标优化设计问题可以表示为以下数学形式:

目标函数表示在设计航速(Fr=0.30)下的DTMB 5415船型的兴波阻力系数。本 算例采用的优化算法是第二章介绍的单目标遗传算法。初始模型船DTMB 5415船 长同样归一化为1m,其他船型参数如表5-1所示。

本优化实例采用的遗传算法中一代种群的个体数量设置为 200,设置的终止 条件为种群代数达到 100 代,即共完成 20000 个个体计算,整理如表 5-5。

表 5-5 基于单目标遗传算法与克里金近似模型的 DTMB 5415 船型优化遗传算法设置 Table 5-5 Ship Hull Optimization Design of DTMB 5415 based on SOGA and Kriging Model - GA Settings

个体数量	种群代数	总迭代次数
200	100	20000

#### 5.3.2 设计变量和近似模型

本节的 DTMB 5415 船体型线优化设计的设计变量和上一节完全一致,也是 通过第三章中的两种船型变换方法:基于径向基函数插值的方法和自由变形方法 进行的,其中基于径向基函数插值的方法实现了船体球鼻艏(声呐罩)处的局部 变换,而自有变形方法实现了船体的前后半体和全船的整体变换。

该优化实例共有六个设计变量: Δ<sub>1</sub>,Δ<sub>2</sub>,Δ<sub>3</sub>,*x*<sub>1</sub>,*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>1</sub>。其中Δ<sub>1</sub>,Δ<sub>2</sub>,Δ<sub>3</sub>是代表基于 径向基函数插值方法的船型变换参数,*x*<sub>1</sub>,*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>1</sub>代表自由变换方法中三个自由变形 的长方体的变形量。本优化实例采用了与上一节相同的优化约束条件,直接对船 体主尺度进行约束,如表 5-3 所示。

为了更直观的表达本优化实例中的近似模型构建情况,将样本点和对应的设 计变量,以及对应的目标函数值,即总阻力,列表如下:

Design No.	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$x_1$	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>Y</i> <sub>1</sub>	$R_t$
1	0	0	0	0	0	0	24.4679N
2	0.008644	-0.00153	0.011593	0.005254	0.006407	-0.00814	24.5282N
3	-0.03	0.005593	-0.00142	-0.00492	-0.00254	0.003424	28.5204N
4	-0.02695	0.002542	0.004678	-0.00186	0.010508	-0.00478	30.0867N
5	-0.02288	0.010678	0.008746	0.007627	0.004542	0.004915	27.8651N
6-48							
49	0.009661	0.009661	-0.00631	-0.01	0.001186	-0.00441	24.3238N
50	0.028983	-0.01373	0.00061	0.002881	0.00678	-0.00329	24.1049N

表 5-6 基于单目标遗传算法与克里金近似模型的 DTMB 5415 船型优化样本点和近似模型 Table 5-6 Ship Hull Optimization Design of DTMB 5415 based on SOGA and Kriging Model – Sample Points and Approximation Model

### 5.3.3 优化结果与分析

经过 20000 次优化迭代,得到一个总阻力最小的优化船型,其设计变量及总阻力值如表 5-7 所示,其与母型船的型线对比如图 5-5 所示。

表 5-7 基于单目标遗传算法与克里金近似模型的 DTMB 5415 船型优化结果 Table 5-7 Results of Ship Hull Optimization Design of DTMB 5415 based on SOGA and Kriging Model

	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$x_1$	<i>x</i> <sub>2</sub>	$\mathcal{Y}_1$	$R_t$
Original Hull	0	0	0	0	0	0	24.4679N

Optimal Hull 0.0211 0.02061 0.00978 0.01082 -0.0083 -0.0127 22.0422N

结合型线对比图 5-6 和设计变量与总阻力对比表 5-7 来看,DTMB 5415 的优 化船型在设计变量(船体形状)变化不大的情况下,其 Kriging 模型预报的总阻力 下降了约 10%。可以看出,其主要变形在于船体更加瘦削,球鼻艏(声呐罩)变 得更瘦且在垂向有一定抬升。

另一方面,本文对该优化船型重新进行了数值模拟,为近似模型和该优化船型进行验证。其总阻力的计算结果为22.3408N,和近似模型预报的结果相差不大,而该阻力相比母型船也减小了约9%,减阻(优化)效果明显。



图 5-6 基于单目标遗传算法的 DTMB5415 船型优化结果 – 优选船型与母型船的型线对比 Fig. 5-6 SOGA based DTMB 5415 hull optimization design results – Comparison of Hull Forms between optimal case and original hull

下面对比优化船型重新进行的 RANS 数值模拟和母型船的数值模拟结果,其 表面压力分布如图 5-7 所示。从船首来看,优化船型的首部压力峰值有明显的降 低,而其更瘦的形状也使其高压区变得更小。从船体底部来看,在船体中后部, 由于形状变化不大,其压力分布也比较近似,主要的压力变化体现在其球鼻艏(声 呐罩)位置。



a) 船首部的压力分布对比(左侧为初始船型,右侧为优化船型)

a) Comparison of pressure distribution on ship bow (original hull-left, optimal hull-right)



图 5-7 基于单目标遗传算法的 DTMB5415 船型优化结果 – 优选船型与母型船的压力分布对 比 Fig. 5-7 SOGA based DTMB 5415 hull optimization design results – Comparison of Pressure

# Distribution between optimal case and original hull

# 5.4 基于多目标遗传算法的 4250TEU 船型优化设计

为了更好地验证本文和 OPTShip-SJTU 船型优化软件采用的方法,本节将对 一个更为复杂的巴拿马型集装箱船进行型线优化设计。同时,本节完整的展示了 一个基于数值计算的优化设计(Simulation-basedOptimizationDesign)的全部流程, 包括了优化目标、设计变量、近似模型、变量分析、优化结果和数值验证。

本节采用的优化算法为多目标遗传算法,近似模型采用优化拉丁方方法和克 里金模型构造,船型变换采用径向基函数插值与自由变换方法,水动力性能评估 采用 NMShip-SJTU 求解器。

### 5.4.1 目标函数和设计变量

本节对该巴拿马型集装箱船的优化考虑了其在三个航速(Fr=0.17,0.21,0.25) 下的船舶兴波阻力系数,因此目标函数为 NMShip-SJTU 预报的该三个兴波阻力系 数。同时,采用对船舶主尺度约束的方式来约束设计变量的范围,其中,垂线间 长、船宽和吃水保持不变,排水体积和湿表面积的变化量约束在1%以内。上述优 化目标和约束条件表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{Min} \ f\left([\mathbf{x}]\right) &= \left\{ f_{obj}^{1}, f_{obj}^{2}, f_{obj}^{3} \right\} \\ f_{obj}^{1} &= C_{w,1}, \quad at \ Fr = 0.17 \\ f_{obj}^{2} &= C_{w,2}, \quad at \ Fr = 0.21 \\ f_{obj}^{3} &= C_{w,3}, \quad at \ Fr = 0.25 \\ [\mathbf{x}] &= \left[ \Delta_{1}, \Delta_{2}, \Delta_{3}, x_{1}, x_{2}, y_{1} \right] \end{aligned}$$
(5-3a)

s.t. 
$$g_1 = L_{pp}^{opt} - L_{pp}^{ori} = 0$$
 (5-3b)

$$g_2 = T^{opt} - T^{ori} = 0 (5-3c)$$

$$g_3 = B^{opt} - B^{ori} = 0 (5-3d)$$

$$g_4 = \left| \frac{\nabla^{opt} - \nabla^{ori}}{\nabla^{ori}} \right| \le 1\%$$
(5-3e)

$$g_{5} = \left| \frac{S_{wet}^{opt} - S_{wet}^{ori}}{S_{wet}^{ori}} \right| \le 1\%$$
(5-3f)

本算例的 4250 TEU 船体型线优化设计是通过第三章中的两种船型变换方法: 基于径向基函数插值的方法和自由变形方法进行的,其中基于径向基函数插值的 方法实现了船体球鼻艏处的局部变换,而自由变形方法实现了船体的前后半体和 全船的整体变换。

该优化实例共有六个设计变量: Δ<sub>1</sub>,Δ<sub>2</sub>,Δ<sub>3</sub>,*x*<sub>1</sub>,*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>1</sub>。其中Δ<sub>1</sub>,Δ<sub>2</sub>,Δ<sub>3</sub>是代表基于 径向基函数插值方法的船型变换参数,三个移动控制点的位置如图 5-8(a)所示, 1 号控制点只能沿着船体纵向移动,2 号控制点只能沿着船体横向移动,3 号控制 点只能沿着船体垂向移动。这样的设计也是为了更好地研究球鼻艏三个方向的尺 寸变化对其兴波阻力的影响。*x*<sub>1</sub>,*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>1</sub>代表自由变换方法中三个自由变形的长方体 的变形量,其中两个分别包裹船舶前后半体的长方体只能沿船体纵向移动,包裹 整船的长方体只可以沿船体横向移动。为了约束船体变形的大小,防止过度变形,本优化实例直接对船体主尺度进行约束,如表 5-8 所示。



几何约束	符号	变化量(%)
垂线间长	$L_{pp}$	0
船宽	В	0
吃水	Т	0
排水体积	$\nabla$	1.0
湿表面积	$S_{\scriptscriptstyle wet}$	1.0
变量约束	最小值	最大值
$\Delta_1$	-0.002	0.002
$\Delta_2$	-0.002	0.002
$\Delta_3$	-0.002	0.002
$x_1$	-0.01	0.01
$x_2$	-0.01	0.01
$\mathcal{Y}_1$	-0.005	0.005

	表 5-8	优化	约束条	4
Table 5-8	Optimiz	zation	Design	Constraints

## 5.4.2 近似模型构建

本优化实例的近似模型是基于优化拉丁方设计的,共有100个样本点,每个样本点的六个设计变量如表5-9所示。对每个样本点代表的船型分别利用NMShip-SJTU求解器进行兴波阻力预报。

Design No.	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$x_1$	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>V</i> <sub>1</sub>
1	0.0001010	-0.0004242	0.0002525	0.0093939	0.0093939	0.0007576
2	-0.0014343	0.0005455	-0.0009596	0.0001010	-0.0023232	-0.0019697
3	0.0008283	-0.0007071	0.0006970	0.0083838	-0.0053535	0.0022121
4	0.0012323	0.0009091	0.0003737	0.0061616	0.0007071	0.0028788
5	0.0008687	-0.0010303	0.0000303	-0.0097980	-0.0065657	0.0008788
6-98						
99	0.0013535	-0.0017172	-0.0005152	0.0067677	-0.0035354	0.0012424
100	0.0007879	0.0013939	0.0005354	0.0075758	0.0075758	-0.0010606

表 5-9 优化变量的试验设计 Table 5-9 Experimental design of optimization variables

优化过程中采用的近似模型由表 5-9 中的样本点通过克里金模型构建。

### 5.4.3 方差分析

为了研究每个设计变量对船舶水动力性能的影响,本小节采用 ANOVA 的方 法对所有样本点代表的船型及其对应水动力性能(目标函数)进行了分析。

图 5-9 展示了 ANOVA 分析的结果,也就是 6 个不同的设计变量  $(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, x_1, x_2, y_1)$  对 3 个目标函数的影响,这里将该6 个设计变量简记为 V1~V6。

从图 5-9 可以看出,在 6 个设计变量中, V1( $\Delta_1$ ) 对这三个目标函数都有着较明显的影响,由于 V1( $\Delta_1$ )主要决定了球鼻艏的长度和体积,可以得到的结论是: 该球鼻艏的长度和体积对这三个航速下的兴波阻力都有较重要的影响。至于另外 5 个设计变量,它们对 3 个目标函数的影响则各不相同。在较低航速下,决定了船 体肥瘦程度的设计变量 V6( $y_1$ ) 起决定性(61%)作用,而在另外两个航速下,这 一作用明显减小。而决定了球鼻艏垂向位置的设计变量 V3( $\Delta_3$ ) 在中高航速下则 对船体兴波阻力影响显著。本小节的分析仅仅是通过 100 个样本点的计算数据和 ANOVA 方法展开的,更细致的分析将在优化过程之后进行。



图 5-9 基于样本点数据对 TEU 4250 水动力性能的 ANOVA 分析结果 Fig. 5-9 ANOVA results of hydrodynamic performances based on sample points data of 4250 TEU

5.4.4 优化结果

优化迭代之后,最终得到的非支配的、可行的所有解展示在图 5-10 当中,其 中每个坐标轴代表不同的目标函数。从中可以看出,该 Pareto 前沿可以明显的分 成两部分:第一部分在图 5-10 (a)中用绿色的方框标识出,另一部分用黄色方框 标识出。从图 5-10 (d)的三维表示中可以看出,前者基本在同一"平面"内,都 有着较高的  $f_{obj}^3$ ,而在图 5-10 (b-c)中,这一"平面"退化成了一个在 Pareto 前 沿上方的"线段"。除此之外,在其他区域内的 Pareto 最优解有着更高的  $f_{obj}^1$ 和  $f_{obj}^2$ 值,和相对较小的  $f_{obj}^3$ 值。这一现象明显将第三个目标函数  $f_{obj}^3$ 与前两个目标函数 区分开来,说明优化目标  $f_{obj}^3$ 和另外两个目标并不具有一致性。这也意味着,如果 设计者想要一个更好的高航速下的兴波阻力性能,可能要适当牺牲该船型在较低 航速下的性能。另一方面,一个在较低航速下兴波阻力性能很好的船型,可能在 高航速下表现不够优秀。

整个 Pareto 前沿给出了超过 900 个兴波阻力优化的解。为了验证本节的优化 结果,选取了三个典型的优选船型,分别命名为 Case-1, Case-2 和 Case-3。这三 个船型分别代表了在三个不同航速下的最小兴波阻力船型。它们对应的船体型线 和优化结果分别在图 5-11 和表 5-10 中给出。



图 5-10 基于多目标遗传算法对 TEU 4250 船的优化结果-Pareto 前沿和优选船型 Fig. 5-10 Optimization results of TEU 4250 hull based on MOGA-Pareto front and selected cases



- a) Case-1 和初始船型的横剖线对比
- a) Comparison of transverse cross-section plans between Case-1 and orignal hull





b) Comparison of transverse cross-section plans between Case-2 and orignal hull



- c) Case-3 和初始船型的横剖线对比
- c) Comparison of transverse cross-section plans between Case-3 and orignal hull


d) Case-1 和初始船型的纵剖线对比

d) Comparison of longitudinal cross-section plans between Case-1 and orignal hull



e) Comparison of longitudinal cross-section plans between Case-2 and orignal hull



f) Case-3 和初始船型的纵剖线对比

f) Comparison of longitudinal cross-section plans between Case-3 and orignal hull

图 5-11 基于多目标遗传算法对 TEU 4250 船的优化结果-优选船型的船体型线与初始船型的 对比

Fig. 5-11 Optimization results of TEU 4250 hull based on MOGA-Comparison of hull forms between selected cases and original hull

	初始船型	Case-1	Case-2	Case-3
$\Delta_1$	0	0.00154	0.00152	0.00181
$\Delta_2$	0	-0.00021	-0.00028	-0.00002
$\Delta_3$	0	-0.00089	-0.00079	-0.00041
$x_1$	0	-0.00459	-0.00123	-0.00959
<i>x</i> <sub>2</sub>	0	-0.00107	-0.00072	-0.00092
$\mathcal{Y}_1$	0	-0.00041	0.00033	-0.00075
排水体积变化量(%)	0	-0.14%	0.07%	-0.13%
湿表面积变化量(%)	0	-0.08%	0.03%	-0.10%
f <sup>1</sup> <sub>obj</sub> (变化量 %)	0.000561	0.000298(46.7%)	0.000309(44.9%)	0.000354(36.8%)
f_{obi} (变化量 %)	0.000711	0.000504(28.9%)	0.000496(30.2%)	0.000563(20.8%)

表 5-10 基于多目标遗传算法对 TEU 4250 船的优化结果-设计变量和性能对比 Table 5-10 Optimization results of TEU 4250 hull based on MOGA- Comparison of design variables and performance between original ship hull and three selected cases

	$f_{abi}^{3}$ (变化量 %	) 0.000942	0.000878(6.87%)	0.000878(6.87%)	0.000824(12.6%)
--	----------------------	------------	-----------------	-----------------	-----------------

从表 5-10 可以看出,除了设计变量 V6 ( $y_1$ ),另外 5 个设计变量在所有优化 船型中都保持一致的正负符号。其中 V1~3 是控制球鼻艏的 RBF 变形方法的设计 变量,他们的符号一致性说明优化船型需要一个更长、更瘦、垂向位置更低的球 鼻艏。对 Case-3 而言,V2~3 ( $\Delta_2, \Delta_3$ )的值比它在 Case-1 和 Case-2 中更小,这说 明低航速的兴波阻力优化需要更瘦和更低的球鼻艏,相反的,Case-3 中较大的 V1 ( $\Delta_1$ )意味着高航速下的兴波阻力优化需要更长的球鼻艏。

从控制全船变化的 FFD 方法来看, V4~5 (*x*<sub>1</sub>,*x*<sub>2</sub>)是控制船体中部的位置和形状的设计变量,而它们在三个优选船型中都是负值。这代表船体中部向后移动的趋势,也就是说兴波阻力的优化需要更长的前半体和更短的后半体。如前文所述,V6 (*y*<sub>1</sub>)决定了船体的肥瘦程度,它在 Case-2 中为正值,在 Case-1 和 Case-3 中为正值,这意味着一个更瘦的船型在较高或较低的航速下都有更好的兴波阻力性能,但在中等航速下却未必如此。表 5-10 中还可以明显看出,目标函数 *f*<sup>1</sup><sub>obj</sub> 和 *f*<sup>2</sup><sub>obj</sub> 的优化程度高于 *f*<sup>3</sup><sub>obj</sub>,这一方面是由于其数值在 *f*<sup>1</sup><sub>obj</sub> 和 *f*<sup>2</sup><sub>obj</sub> 中更小,另一个可能的原因是该初始船型的设计更多考虑了其在高航速下的性能,而忽视了低航速下的兴波阻力性能。

#### 5.4.5 对优选船型的验证

为了验证三个优选船型和整个优化结果,本小节分别采用 NMShip-SJTU 和 naoe-FOAM-SJTU 预报它们的水动力性能。

NMShip-SJTU 和 naoe-FOAM-SJTU 的计算结果和对比分别展示在表 5-11 和 图 5-12 当中。

F	r	0.17			0.21			0.25		
阻力成分	分(×10 <sup>3</sup> )	$C_{w}$	$C_{\mathrm{f}}$	$C_t$	$C_w$	$C_{\mathrm{f}}$	$C_t$	$C_{w}$	$C_{\mathrm{f}}$	$C_t$
初始船	NM	0.561	3.125	3.685	0.711	3.005	3.715	0.942	2.922	3.864
型	RANS	/	/	3.899	/	/	3.927	/	/	3.989

表 5-11 优选船型的验证-NMShip-SJTU 和 naoe-FOAM-SJTU 预报结果对比 Table 5-11 Verification of selected cases - Comparison of the optimization results based on NM theory and RANS solver naoe-FOAM-SJTU

C 1	NM	0.309	3.125	3.434	0.526	3.005	3.531	0.877	2.922	3.799
Case-1	RANS	/	/	3.796	/	/	3.879	/	/	3.899
Casa 2	NM	0.332	3.125	3.457	0.505	3.005	3.51	0.887	2.922	3.809
RA	RANS	/	/	3.804	/	/	3.841	/	/	3.913
Case-3	NM	0.373	3.125	3.498	0.561	3.005	3.566	0.812	2.922	3.734
	RANS	/	/	3.864	/	/	3.877	/	/	3.875

上海交通大学硕士学位论文





可以看出,NM理论预报的兴波阻力值与 5.4.2 节中构建的近似模型所预报的 结果十分接近,这也说明了该 100 个样本点构造的近似模型是有效的。同时,从

表 5-11 和图 5-12 中可以看出,在低航速下,NMShip-SJTU 和 naoe-FOAM-SJTU 求解器预报的结果存在一定偏离,高航速的预报结果则比较接近。

另外,图 5-13 和图 5-14 展示了 NMShip-SJTU 求解器预报的优选船型 Case-1 和初始船型的自由面兴波和船体表面波高。从船体兴波的角度来看,优选船型 Case-1 在三个航速下都有更小的波幅,这主要是因为它有更瘦长的球鼻艏来抑制 船体兴波。









高精度的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对优选船型 Case-1 的自由面兴波预 报的结果展示在图 5-15 当中。图中可以看出,无论是船首兴波还是船尾兴波,以 及自由面的散波幅度,优选船型 Case-1 的兴波幅度在每个航速下都有所降低,这 一结果也证实了其阻力降低的结论。



图 5-15 优选船型 Case-1 的验证- naoe-FOAM-SJTU 计算的的自由面兴波预报结果对比 Fig. 5-15 Verification of selected Case-1 - Comparison of the free surface predicted by naoe-FOAM-SJTU between original hull and case-1 at three speeds

## 5.5 本章小结

本章在第四章的基础上,加入了近似模型技术,同时对优化目标都提高为多目标,这在一定程度上使优化问题更加复杂。同时,优化船型的复杂度也有一定提高,分别为 DTMB5415 和 4250TEU,本章对近似模型和基于 RANS 的粘性流体求解器的船型优化也做了进一步验证。

# 第六章 总结与展望

#### 6.1 全文总结

一方面,船舶型线的优化设计,已经成为船舶设计者越来越关心的问题。另 一方面,发展计算流体力学的一大目的,就是为了在船舶设计阶段给出更好的设 计建议。在计算流体力学方法和计算机技术不断进步的情况下,实现全自动的船 型优化具有极为重要的意义。

本文在研究各类优化算法和近似模型技术的基础上,开发了船型优化设计软件 OPTShip-SJTU 中的优化模块和近似模型模块,并实现了全自动化的船体型线优化设计流程。基于该流程的 OPTShip-SJTU 软件,本文对多个船型,包括 Series 60、DTMB 5415 和 4250 TEU,进行了水动力性能优化设计。

在优化设计完成后,本文还对优化船型以及所采用的近似模型,进行了进一步的验证分析。验证结果表明,本文采用的优化算法、近似模型技术以及船型变换方法、水动力性能预报方法能够帮助船舶设计者找到更好的船型设计。

### 6.2 研究展望

本文虽然完成了船体型线数值优化求解器 OPTShip-SJTU 及其优化模块的开发工作,并对多个船型进行了优化验证,但仍有许多方面的不足,可以在今后进一步开展更为深入的研究:

- (1)本文采用的优化算法仍需要做进一步的改进和优化,提高寻优能力, 以助于找到更好的船型设计,并提高船型优化的效率;
- (2)近似模型技术的核心在于其能否精确的刻画所要代替的模型,今后可以尝试更多的近似模型参数或更先进的近似模型技术,通过更精确的近似模型完成船型优化设计,得到的最优船型就更加精确。
- (3)本文的船型优化设计都是以兴波阻力系数或总阻力系数为优化目标完成的。在本文完成的船型优化设计框架基础上,结合更复杂的设计目标和性能评估方法,可以实现对船舶的更多性能实现优化设计,最终实现船舶性能的综合优化设计。

参考文献

- [1] Harries, S. Parametric design and hydrodynamic optimization of ship hull forms[M]. Mensch-und-Buch-Verlag, 1998.
- [2] Huan, J., Huang, T. T. Sensitivity analysis methods for shape optimization in nonlinear free surface flow[C]//In Proceedings, 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design. Osaka Prefecture Univ. and Osaka Univ., Japan. 1998.
- [3] Tahara, Y., Paterson, E. G., Stern, F., & Himeno, Y. Flow-and wave-field optimization of surface combatants using CFD-based optimization methods[C]//In Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics. 2001.
- [4] 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.
- [5] Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., & Teller, E. Simulated annealing[J]. Journal of Chemical Physics, 1953, 21, 1087-1092.
- [6] Fraser, A. S. Simulation of genetic systems [J]. Journal of Theoretical Biology, 2(3), 1962, 329-346,.
- [7] Bagley, J. D. The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms[D]. Ann Arbor: University of Michigan. 1967.
- [8] Holland, J. H. Adaptation in natural and artificial system: an introduction with application to biology, control and artificial intelligence [M]. Ann Arbor, University of Michigan Press. 1975.
- [9] DEJONG, K. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D] Ann Arbor: University of Michigan. 1975.
- [10] Goldberg, D. E., Deb, K. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms[J]. Foundations of genetic algorithms, 1991, 1, 69-93.
- [11] Goldberg, D. E., Richardson, J. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization[C]//In Genetic algorithms and their applications: Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum. 1987.
- [12] Schaffer, J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms[C]//In Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms, Pittsburgh, PA, USA, July 1985.
- [13] Srinivas, N., Deb, K. Muiltiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary computation, 1994, 2(3), 221-248.

- [14] 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.
- [15] Eberhart, R. C., Kennedy, J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//In Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science, 1995.
- [16] Peri, D., Campana, E. F. Multidisciplinary design optimization of a naval surface combatant[J]. Journal of Ship Research, 2003, 47(1), 1-12.
- [17] Campana, E. F., Peri, D., Tahara, Y., Stern, F. Shape optimization in ship hydrodynamics using computational fluid dynamics[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2006, 196(1), 634-651.
- [18] Pinto, A., Peri, D., Campana, E. F. Multiobjective optimization of a containership using deterministic particle swarm optimization[J]. Journal of Ship Research, 2007, 51(3), 217-228.
- [19] Tahara, Y., Peri, D., Campana, E. F., Stern, F. Single-and multiobjective design optimization of a fast multihull ship: numerical and experimental results[J]. Journal of marine science and technology, 2011, 16(4), 412-433.
- [20] Tahara, Y., Kobayashi, H., Kandasamy, M., He, W., Peri, D., Diez, M., Stern, F. CFD-based multiobjective stochastic optimization of a waterjet propelled high speedship[C]//In 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden. 2012.
- [21] Campana, E. F., Liuzzi, G., Lucidi, S., Peri, D., Piccialli, V., Pinto, A. New global optimization methods for ship design problems[J]. Optimization and Engineering, 2009, 10(4), 533-555.
- [22] Kim, H., Yang, C., Löhner, R., Noblesse, F. A practical hydrodynamic optimization tool for the design of a monohull ship[C]//In The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers. 2008.
- [23] Kim, H. Multi-objective optimization for ship hull form design[D]. George Mason University. 2009.
- [24] Kim, H., Yang, C., Jeong, S., Noblesse, F. Hull form design exploration based on response surface method[C]//In The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers. 2011.

- [25] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 等. 基于 CFD 的船型自动优化技术研究 [C] //2008 年船舶水动力学学术会议暨中国船舶学术界进入 ITTC30 周年纪念 会论文集.2008.
- [26] 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.
- [27] 李胜忠, 蒋昌师, 倪其军, 等. 基于 FFD 重构方法的船型优化设计及其模型 试验验证[C]//第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研 讨会论文集——D 水动力学实验和测试技术.2014.
- [28] 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.
- [29] 李胜忠, 倪其军, 赵峰, 刘卉. 大方形系数低速船艉部线型多目标优化设计[J]. 中国造船, 2013, 54(3), 1-10.
- [30] Winer, B. J., Brown, D. R., Michels, K. M. Statistical principles in experimental design[M]. New York: McGraw-Hill. 1971.
- [31] Simpson, T. W., Booker, A. J., Ghosh, D., Giunta, A. A., Koch, P. N., Yang, R. J. Approximation methods in multidisciplinary analysis and optimization: a panel discussion[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2004, 27(5), 302-313.
- [32] Peri, D., Campana, E. F. Variable fidelity and surrogate modeling in simulationbased design[C]//In 27th Symposium on Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea, 2008.
- [33] 梁军, 许劲松, 谢杰, 等. 基于设计空间探索的型线自动优化[J]. 船舶力学, 2010, 14(7): 741-748.
- [34] 程成, 须文波, 冷文浩. 基于 iSIGHT 平台 DOE 方法的螺旋桨敞水性能优化设计[J]. 计算机工程与设计,2007,28(6):1455-1459.
- [35] 上海交通大学. 基于 Neumann-Michel 理论船舶静水阻力求解器 NMShip-SJTU [CP]. 著作权登记号:2015SR011407.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Murty, Katta G. Linear programming[M]. John Wiley & Sons Inc, New York. 1983.
- [39] Dantzig G B, Cottle R. The Basic George B. Dantzig[M]. Stanford Business Books, Stanford University Press, Stanford, California, 2003.
- [40] George B. Dantzig and Mukund N. Thapa. Linear programming 1: Introduction. [M] Springer-Verlag. 1997.

- [41] George B. Dantzig, Mukund N. Thapa. Linear Programming 2: Theory and Extensions[M]. Springer-Verlag. 2003.
- [42] Michael J. Todd. The many facets of linear programming[J]. Mathematical Programming. 2002, 91 (3): 417–436.
- [43] Steinbrunn M, Moerkotte G, Kemper A, et al. Heuristic and randomized optimization for the join ordering problem[J]. Very Large Data Bases, 1997, 6(3): 191-208.
- [44] 崔连琼. 多目标遗传算法及其在船舶型线优化中的应用[D]. 武汉理工大学, 2008.
- [45] Liu, X.Y., Yuan, Q., Zhao, M., et al. Multiple objective multidisciplinary design optimization of heavier-than-water underwater vehicle using CFD and approximation model[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2016, 1-14. (Early Online).
- [46] De, Boer A., Van, M.S., Bijl, H., Mesh deformation based on radial basis function interpolation[J]. Computers & structures, 2007, 85(11): 784-795.
- [47] 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.
- [48] Noblesse, F., Huang, F., Yang, C., The Neumann–Michell theory of ship waves[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2013, 79(1): 51-71.
- [49] 刘晓义,吴建威,赵敏,万德成. 基于 NM 理论和序列二次规划的船型优化设计 [C]//2015 年船舶水动力学学术会议,黑龙江哈尔滨,2015.
- [50] 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 (5): 535-541.
- [51] Liu, X. Y., Wu, J. W., Wan, D. C., Multi-objective optimization for a surface combatant using Neumann-Michell theory and approximation model[C]//The 12th International Conference on Hydrodynamics, Egmond aan Zee, The Netherlands, Sep. 2016.
- [52] Liu, X.Y., 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.
- [53] Shen, Z., Wan, D., RANS computations of added resistance and motions of a ship in head waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013, 23(04): 264-271.

- [54] 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.
- [55] Alessandrini, B., Delhommeau, G. A fully coupled Navier–Stokes solver for calculation of turbulent incompressible free surface flow past a ship hull[J]. International journal for numerical methods in fluids, 1999, 29(2): 125-142.

## 致 谢

转眼间,在交大已经度过六年半的美好时光。回想起来,在交大经历的点点 滴滴,都成为最美好的回忆。这篇硕士毕业论文,只是一点微小的工作,也是对 这几年硕士学习的总结。借此机会,要向许许多多支持和帮助过我的人表达我最 真诚的感谢。

首先要感谢我的父母,二十多年来的含辛茹苦,是我现在还远远不能体会的。 你们乐观生活、辛勤工作的态度,作为人民教师无私奉献的精神,对家庭和亲人 的全心付出,都是我一生的财富。

感谢我的导师万德成教授,从大二的流体力学课程开始,万教授严谨治学、 平易近人的态度就深深吸引了同学们。加入万教授的课题组,更是为我打开了学 习计算流体力学的大门。在三年多的学习和科研当中,万教授悉心指导工作,鼓 励大家交流,认真听取建议,从问题的分析到论文的修改,都给了我最宝贵的意 见和帮助,也奠定了我继续从事科研的信心。感谢水下工程研究所的赵敏老师, 自本科以来的指导和帮助,让我深深体会到一个青年学者的朝气和科研工作者应 有的勤奋努力。

感谢一同进入课题组的吴建威、罗天、尹崇宏、吴惠宇、孙涛和彭耀,和你们 一同工作的日子给了我许多收获。吴建威的认真负责,罗天的细心热情以及尹崇 宏的善于学习都十分值得我学习,期待你们为祖国的高铁和舰艇事业做出贡献。 吴惠宇极为聪明机智,有着令我羡慕的智慧,孙涛和彭耀的科研能力极强,祝愿 你们在未来的学习和工作中取得更多成绩。

感谢沈志荣、叶海轩、查若思师兄,你们在我学习和使用 OpenFOAM 的过程 中给予了我无私的帮助,耐心回答我的问题,提高我的知识水平。期待在大洋彼 岸与你们的再次相聚。感谢赵伟文、王建华、张晨亮师兄,你们不仅给了我许多 学习上的帮助,还让 A708 的生活更加快乐和谐。感谢课题组的曹洪建、张雨新、 朱怡、周胡、刘远传、孟庆杰、唐振远、刘小健、程萍、张友林、何佳益、杨亚强、 李鹏飞、李海洲,是你们为小组的科研工作打下了良好的基础。感谢端木玉师姐 一直以来的关心和帮助,祝你的宝宝乐观健康地成长!感谢夏可、缪爱琴、庄园、 刘正浩、陈翔、付博文、饶成平、艾勇等同学,是你们的活泼为我的硕士生活增添 了更多的光彩。 感谢我的好友杨磊、王龙翔、张赫、程昊、张正宇、王夫一、陈承博、赵宏、 孙铭,十多年来的共同成长让我们成为永远的兄弟。更要感谢美丽的交大校园, 让我幸运地遇到了你,给我不断的支持和力量。

还要感谢每一位给过我帮助、支持和影响过我成长的人,特别是一位伟人的 名言激励了我的成长和进步:"苟利国家生死以,岂因祸福避趋之",我将永远铭 记在心,也祝福他永远年轻!

# 攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] **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(5):535-541.
- [2] Liu, X. Y., Wu, J. W., Wan, D. C., Multi-objective optimization for a surface combatant using Neumann-Michell theory and approximation model[C]//The 12th International Conference on Hydrodynamics, Egmond aan Zee, The Netherlands, Sep. 2016.
- [3] Liu, X. Y., Zhao, W. W., Wan, D. C., Verification and validation for CFD simulation of KRISO container ship[C]//Tokyo 2015 Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Tokyo, Japan, Dec. 2015.
- [4] Liu, X. Y., Wan, D. C., Numerical Simulation of Ship Yaw Maneuvering in Deep and Shallow Water[C]//The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference, Hawaii, U.S., Jun. 2015.
- [5] **刘晓义**,吴建威,赵敏,万德成. 基于 NM 理论和序列二次规划的船型优化设计 [C]//2015 年船舶水动力学学术会议,黑龙江哈尔滨,2015
- [6] 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, 广西南宁, 2015.