



上海交通大学本科毕业论文

内陆交通船标准船型优化设计
-以太湖地区为例

学 生：

学 号：

专 业：船舶与海洋工程

导 师：

学校代码：10248

上海交通大学继续教育学院

二〇一三年八月

毕业论文声明

本人郑重声明：

1、此毕业论文是本人在指导教师指导下独立进行研究取得的成果。除了特别加以标注和致谢的地方外，本文不包含其他人或其它机构已经发表或撰写过的研究成果。对本文研究做出重要贡献的个人与集体均已在文中作了明确标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

2、本人完全了解学校、学院有关保留、使用学位论文的规定，同意学校与学院保留并向国家有关部门或机构送交此论文的复印件和电子版，允许此文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学网络教育学院可以将此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文。

3、若在上海交通大学网络教育学院毕业论文审查小组复审中，发现本文有抄袭，一切后果均由本人承担（包括接受毕业论文成绩不及格、缴纳毕业论文重新学习费、不能按时获得毕业证书等），与毕业论文指导老师无关。

作者签名：

日期：

内陆交通船标准船型优化设计-以太湖地区为例

摘要

对内河交通船进行标准化船型设计，是从根本上增强内河交通船抗风险能力，提高船舶经济效益，减少能源消耗，并促进运输业等稳定、健康、可持续发展的有效措施之一。因此，内河标准交通船船型应体现安全性、经济性、适用性、环保性、节能性，不断提高交通船的现代化水平。论文结合某一地区的水上交通的自身特点，对交通船的标准化船型进行优化设计，并进行评价，为促进内河船舶制造业、交通业生产可持续发展提供一个参考依据。

关键词：内河交通船，船型，太湖

Inland transport ship standard ship Optimization

- A Case Study of Taihu Lake

ABSTRACT

Boat traffic on the river to standardize ship design that is radically enhance the ability to resist risks river boat traffic, improve ship economic efficiency, reduce energy consumption and to promote transportation and other stable, healthy and sustainable development of effective measures. Therefore, river boat ship should reflect standard traffic safety, economy, serviceability, environmental protection, energy efficiency, and continuously improve the modernization level of boat traffic. Papers combined with an area of their own water transport characteristics of the standardization of ship transport ship to optimize the design and evaluation, to promote inland vessels manufacturing, transportation manufacturing industry to provide a reference basis for sustainable development.

Key words: Inland transportation boat, ship model, Taihu Lake

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 选题背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.3 研究方法和内容.....	2
第二章 理论基础.....	3
2.1 船舶设计概论.....	3
2.1.1 船舶的概念和分类.....	3
2.1.2 船舶设计特点	3
2.2 交通船船型设计的理论.....	3
第三章 太湖流域内河交通船船型设计思路.....	5
3.1 确定优化设计母型船.....	5
3.2 线型阻力的要求.....	7
3.3 船舶稳性衡准的要求.....	7
3.4 机桨匹配优化设计.....	8
3.5 综合分析.....	9
第四章 内河交通船船型优化.....	10
4.1 优化工具和技术.....	10
4.2 优化的基本原理.....	10
4.3 优化步骤.....	11
4.4 优化结果与数据分析.....	16
第五章 船型优化的评价.....	21
5.1 技术评价.....	21
5.2 政策评价.....	22
第六章 结束语.....	23
参考文献.....	24
谢辞	25

第一章 绪论

对内河交通船进行标准化船型设计, 是从根本上增强内河交通船抗风险能力, 提高船舶经济效益, 减少能源消耗, 并促进运输业等稳定、健康、可持续发展的有效措施之一。因此, 内河标准交通船船型应体现安全性、经济性、适用性、环保性、节能性, 不断提高交通船的现代化水平。论文结合某一地区的水上交通的自身特点, 对交通船的标准化船型进行优化设计, 促进内河船舶制造业、交通业生产可持续发展。

1.1 选题背景和意义

随着水路运输和造船业的发展, 内河在经济发展中的作用日益突出, 越来越多的人关注船舶的安全性、适航性和环保性。船型的科学设计能够提高船舶的使用效率、产生经济效应和社会效应。而船型的设计优化首先要从船体入手。目前, 造船业进入一个快速发展期, 我国已成为一个造船大国, 根据有关统计, 截至2012年10月中国造船业界新订单量超过韩国中国业界共获得了610.6万CGT(350艘)、128.353亿美元订单。但是, 我国还不是一个造船强国。在船型的设计、环保、经济性方面和世界造船强国还有不小的差距, 尤其表现在内陆船上。

内陆地区由于水域河道的特殊性, 船舶的各种性能要受到客观因素的限制, 如何合理设计适合航道、符合航行安全、节能环保的内陆船变得尤为重要。船舶设计是造船的第一道关口, 造船是船舶生命线的开始。同时, 船舶又是运输业发展的生产工具。因此船舶设计影响这造船业和交通运输业的科学发展。

太湖地区地处长江中下游, 水运交通发达, 经济发展速度较快。该地区的商船或者交通船的结构造型功能具有一定的代表性, 而且太湖流域的安徽、上海、江苏等地都是造船业较发达的省份, 对于研究内陆商船、交通船的结构设计具有足够的数据库。本文将围绕太湖流域的船舶船型进行研究, 探讨船型的优化设计具有可行性。

本论文的研究成果将对提高我国内河船舶标准化和内河航运发展和船型设计开发具有重要指导意义。它对于促进内河船舶标准进一步与国际接轨具有重要的学术价值。

1.2 国内外研究现状

近年来, 随着内陆经济的快速增长, 使得内河运输的需求得到快速增长, 对船舶船型的要求也发生了较大变化, 长期存在的船龄较长、吨位偏小、船型杂乱、造船技术落后、营运方式陈旧的状况慢慢发生改变。通过对内河运输船舶发展相适应的球鼻首、双尾船型等一批专项技术的研究成果普及应用, 内河运输船舶正朝着船型标准化、载重大型化、种类专业化、运输方式多样化方向发展。

1. 船型标准化

随着我国政府吸取国际内河运输发达国家的先进经验, 成功推行了船型标准化的工作, 相继实施了一批示范工程, 如京杭运河船型标准化、长江上游河段及三峡库区船型标准化工程等。

内河运输船标准船型的研发中, 充分利用了内河通航设施、提高航道等运输资源的利用率, 着重考虑船舶的安全、节能环保、经济等性能。以京杭运河为例, 通过推进运输船的船型标准化, 苏北段河道通过量增加 25%以上, 货物通过量提高 40%以上, 很明显提高了运

输承载力和效率。

2. 载重大型化

据有关统计，2008 年底长江水系货运船舶的平均净载重量为 650.5 吨/艘，比 2003 年的增长了 1.51 倍，年均增长率为 20.2%。同时，京杭运河自实施船型标准化示范工程以来，船舶平均吨位也增加了 35%以上，其他河道如长江水系、珠江干线净载重量均取得较大幅度的增长，体现了实施船型标准化后，船舶体现大型化特征，载重能力得到较大提升。

随着船舶载重量的增大，船舶单位能耗出现明显降低的特征。长江上游为例，单重庆市总运力就由 91 万载重吨增长到 356 万载重吨，运输船舶平均吨位由 400 载重吨增长到 1230 载重吨，运输船舶的平均单位能耗降幅达 59%，年均下降 14%，体现出节能降耗的巨大成果。

3. 种类专业化

随着水路运输的不断发展，我国内河运输船型种类相继出现了石油液化气运输船、商品汽车运输船、载重汽车滚装船、无舱盖集装箱江海直达运输船等各种专业运输船舶。这些是运输船舶专业化的体现，促进了水路运输技术的进步，也为船舶运输企业带来了经济效益和社会效益。

4. 运输方式多样化

随着内河运输能力的增加，在原有单船运输和船队运输基础上，出现了其他的船舶运输方式，并得到快速发展。

江海直达运输便是其中一种，这种模式减少中间环节、降低了货物损耗、削减了运输成本，颇受船东青睐。这种模式尤其对与太湖流域地区来说，无疑是非常适合的。这种在其他沿海流域地区不断得到推广。

我们来看看欧洲的船型研究现状，欧洲实行《欧洲地区内河航运船舶统一技术标准》，建立了内河船舶船型的标准化。欧洲内河典型货船为了降低造价，具有高长宽比低干舷的特征，并通过水密的舱口围板来解决船板稳性难题，来实现降低造价。通过比较，这种舷型也适合我国运河这种渠化的航道，来实现降低造价的目的，促进我国运输船舶型标准化进程。有关主管部门正通过立项研究该船型的可行性，结合航道情况，主要研究干舷、舱口等相关尺度与结构强度、稳性之间的关系，从而确定合适的干舷尺寸。

1.3 研究方法和内容

本文采取实例设计的方法结合理论的简要介绍，建立对太湖流域运输船的船型的设计模型，进而利用优化工具对该模型进行优化设计，最后对船型优化从技术和政策角度进行评价，论证设计模型的科学性、可行性。

本文的内容分为三部分。第一部分提出问题，包括第一章，明确为什么要研究这个课题，研究的现状如何。第二部分是分析问题，包括第二章的内容，介绍运输船型的有关理论，为船型的设计提供了理论依据；第三部分则是解决问题，即文本的第三至五章，是本文的重点部分，提出了太湖流域运输船型设计的思路、船型的优化，最后对船型的优化进行评价。

第二章 理论基础

2.1 船舶设计概论

2.1.1 船舶的概念和分类

自古以来，船舶是人类最重要的水上交通工具，可以说世界船舶史就是人类文明史和科技史的所应。船舶经历了独木舟和木板船的木质船体时代，发展到今天的钢材为船体材质的时代^[1]。

船舶按照动力来进行分类，有浆船、帆船和轮船。按照用途来划分，有军用舰船、民用船舶。其中民用船舶中又分为客船、货船、船用船只和运动艇。本文的研究对象主要是货船，因为相对于其他船型，货船应用广泛、数量最多、与经济社会发展最直接相关。

2.1.2 船舶设计特点

船舶运行在水面上，由于水面环境条件特殊型和运行的复杂性，船舶类型多、技术含量高、生产设计到使用的周期长，其设计的复杂程度甚至超过了飞机。

运输船舶的组成部分包括船体结构、主机控制系统、舵装置、电气装置、通信系统等。船舶设计是分专业、分部门进行的，其中船体结构的设计分为船体、舾装、涂装三大部分，船舶设计的特点是各部分既是一个独立系统，但相互间又有密切的联系，设计和制造是由多种专业分工协作完成的。因此在设计中必须要做到统筹兼顾，体现现代造船技术强调壳舾涂一体化的思想。

船舶设计要求适用、经济、安全、可靠、先进、美观。船舶的设计要求以设计技术任务书为载体，包括了航区和航线、船型、用途、船籍和船籍、动力装置航速和功率储备、船体结构等要求。

2.2 交通船船型设计的理论

运输船是最为普及的民用船舶类型，其设计主要依据通用船舶设计原理，针对内河运输船的特点，其设计要符合内河航道法规的相关要求，考虑船舶重量和重心、舱容和布置地位，进行方案的构思与主尺度选择、型线设计、总布置设计，当然在设计过程中要充分利用信息化的手段，采用计算机辅助设计，进行船型的设计和优化。

姜文英等提出船体型线的变量化设计模型，用于船舶型线的表达与设计。描述了使用该模型进行船体型线设计的计算机辅助设计(CAD)方法，其主要包括船体型线数据的管理、数学模型的定义，以及三维空间模型的建立和修改。用数学模型定义了型线设计各元素的位置信息和元素之间的拓扑关系，按照数学模型构建和修改三维空间模型，完成船体型线的设计。在船体型线的设计过程中，基于变量化设计模型对设计进行修改，能够实现型线设计方案的快速重构，避免重复设计，有效地提高了型线设计的质量和效率[2]。

马中亚把一系统船舶设计理论结合起来，如工程理论、模糊数学思想、层次分析法与舰艇总布置设计的理论等等，提出了船舶总布置设计评估的指标理论，对评估指标中的重要性即通达性进行了较为深入地研究，建立了舰船总体布置方案尤其是多目标模糊决策的设计模型，并结合实例进行了评价^[3]。

冯佰威提出整合船体型线多学科的设计优化平台，以船体型线水动力性能为主，开展多学科设计优化的关键技术的研究。着重讨论了多学科设计优化的可行性、特点及设计过程

模型，目的是为船舶设计领域如何进行 MDO 的有效实施提供思路。在这个基础之上，从船体型线水动力性能出发到综合优化的具体问题，研究讨论了系统实现过程中迫切需要解决的基础理论问题，最后确立了船体型线多学科的设计优化平台的模型[4]。

王言英认为计算流体力学(CFD)方法是应用理论流体力学或数值流体力学的方法, 计算和预报船舶水动力性能的一种方法。应用理论的、或者理论与经验相结合的方法来预报船舶水动力性能。并经有限量的实船或模型实验验证以构成有效的 CFD 方法, 是船舶设计工程师所向往的。毋庸置疑, 这对于未来的高技术含量、高附加值船舶的设计与制造是必需的。不论从理论上还是从实践上来看, 应用 CFD 方法直接从事船舶水动力性能预报都是可能的[4]。

2.3 标准船型指标体系

为了进一步促进船舶设计的标准化, 2012 年 4 月 10 日, 交通运输部正式公布了《内河运输船舶标准船型指标体系》, 提出新建船舶除满足适用的规范和法规的技术要求外, 应满足该指标体系提出的相关要求。该指标体系将自 2012 年 7 月 1 日起生效施行。

据悉, 该指标体系的建立主要从“安全、高效、绿色、先进”四个方面入手, 在安全(包括环保)上, 以现行船舶建造规范法规的要求为基础; 在高效上, 通过船舶主尺度系列标准, 提高船舶与船闸、升船机等通航设施的适应性和通过能力, 通过能源强度指标, 提高船舶的能效性能; 在绿色上, 通过二氧化碳排放强度指标, 实现船舶减排的目标; 在先进性上, 通过鼓励新材料、新技术、新方法、新设备、新工艺和新能源等在船舶上的应用, 实现技术进步。

十七大以来, 中央提出了建设生态文明的战略思想, 运输船舶的节能降耗也成为运输业和船舶制造业的重要课题。2012 年 12 月, 中国船级社发布了《内河绿色船舶规范》旨在倡导发展和应用绿色技术, 促进造船业、相关制造业和航运业产业结构优化升级, 促进航运企业对新建船舶和现有船舶采取具有成本效益的技术和管理措施, 提高运输船队营运的绿色度, 在安全的前提下实现船舶的低消耗、低排放、低污染、舒适的目标。该规范自 2013 年 1 月 1 日起生效。

第三章 太湖流域内河交通船舶设计思路

太湖流域位于长江三角洲的南缘，土地总面积 36895 平方公里。行政区划包括上海市（崇明县除外），江苏省的苏州、无锡、常州三市、镇江市的丹阳市、浙江省的嘉兴、湖州市全部和杭州市及部分县，共有 9 座特大、大、中城市和近 30 个县。太湖流域地貌类型以平原为主，其间河网稠密，湖泊众多，江河湖海相通，水路交通发达，船型种类较多，存在船型混杂、是图纸设计不规范、各地标准不一致、管理基础薄弱等问题，以该地区的船舶作为例子进行内陆船舶船型的设计优化具有一定的代表性。

3.1 确定优化设计母型船

本章提供了太湖流域运输船模型，船体模型共有三种线型。

总体思路是，对内河主力船型以三种线型（模型1、2、3）进行CFD计算，对阻力、横稳性和航速三项性能进行优选，取得了对三种线型的综合评估结论。确定某种船型为母型船，进而进行稳性衡准，如衡准合格则最终确定优化设计母型船。以下图形采用计算机辅助设计CAD软件进行建模。

船体二维纵向线性图如图3-1、图3-2、图3-3所示，三种船体结构的中剖面系数分别为：
模型1: $C_m = 0.8587$ 模型2: $C_m = 0.8852$ 模型3: $C_m = 0.899$ 。

船体参数

总长: L_{max} 10.33 m

二柱间长: L_{pp} 9.20 m

水线长: LW 8.92m

总宽: B_{max} 1.96 m

型宽: B 1.88 m

型深: D 0.68 m

设计吃水: d 0.35 m

主机功率: 8.82kW

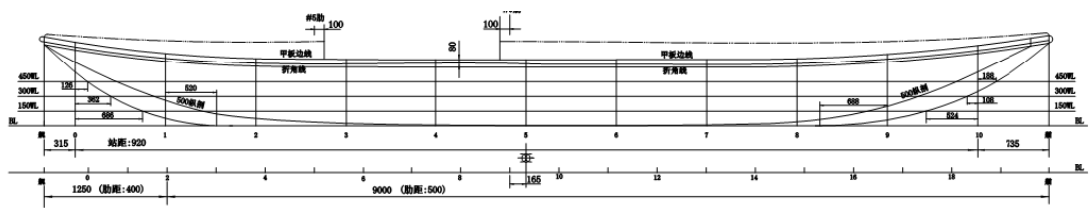


图 3-1 模型 1 的二维纵向线型图

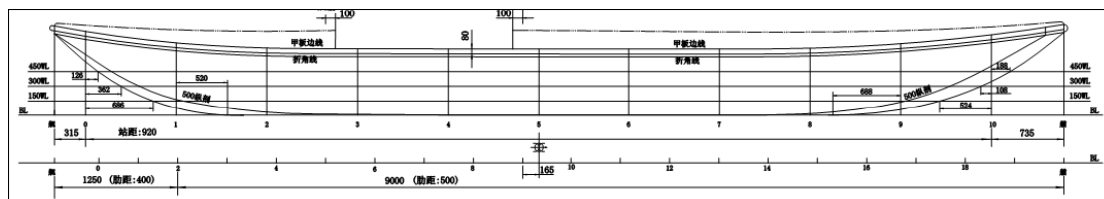


图 3-2 模型 2 的二维纵向线型图

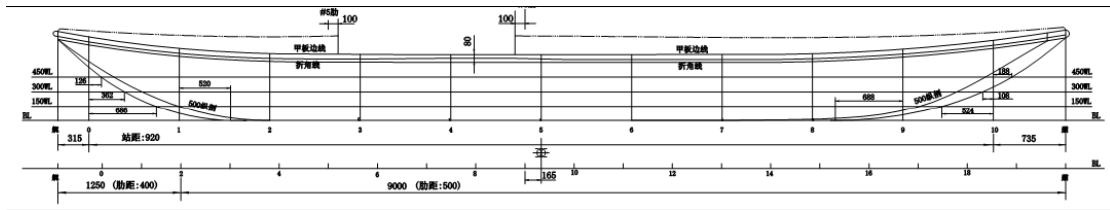


图 3-3 模型 3 的二维纵向线型图

为了对船体进行综合性考核，根据船体线性图进行船体的三维模型建立，得到的三维模型如图 3-4、图 3-5、图 3-6 所示。已知船体的主机功率为 12hp (8.82kW)，在此功率下分别计算三种船型各种能达到的最大航速。同时对三种船形的稳性进行计算对比，然后综合考量哪种船形的性能最优，得到可行方案。

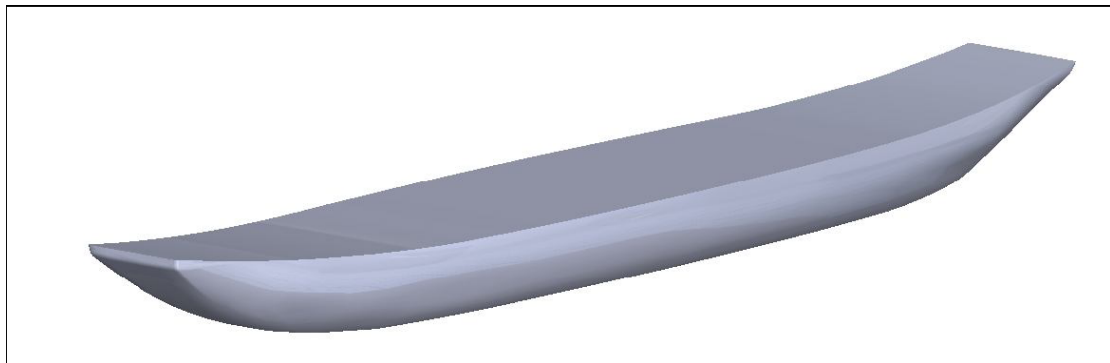


图 3-4 模型 1 的二维纵向线性图

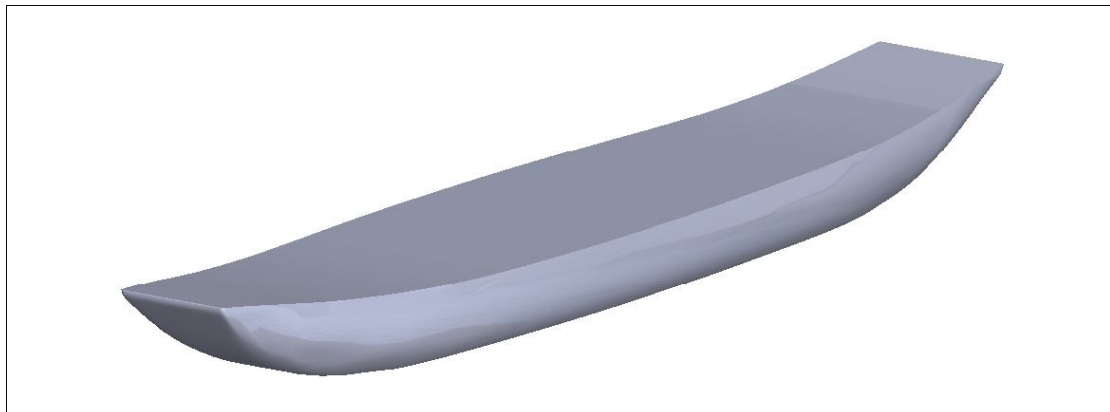


图 3-5 模型 2 的二维纵向线性图

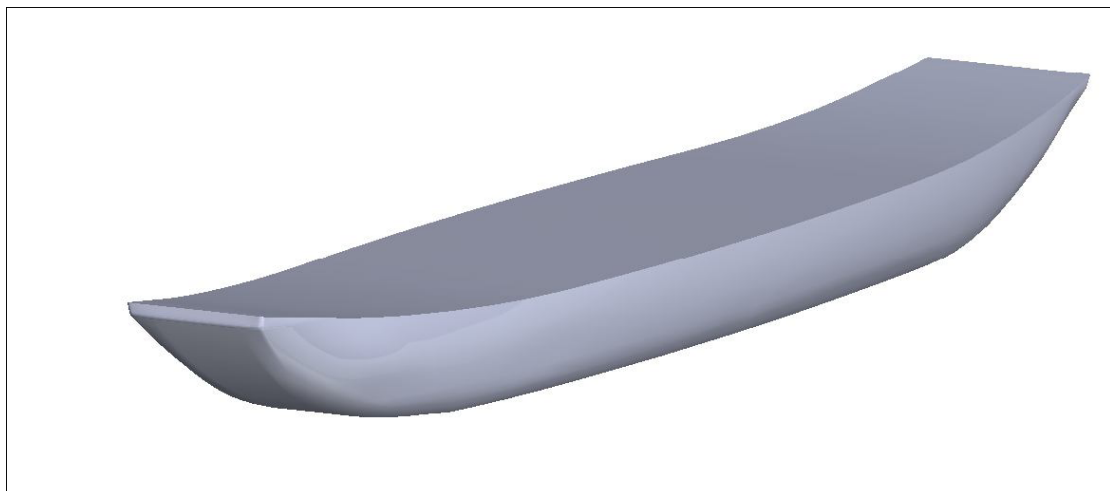


图 3-6 模型 3 的二维纵向线性图

根据 CFD 计算结果，三种线型的航速差别不大，考虑内河运输船在太湖流域对于航速要求不高的特点，故暂不对首尾线型进行改动。

3.2 线型阻力的要求

通过 CFD 的计算得到船体在不同航速情况下的船体阻力数据，从而绘制了三种船型在不同航速下船体有效功率曲线，三条船的船体有效功率大小依次为模型 3 大于模型 2 大于模型 1，如图 3-7 所示，将整理出三种船型在不同航速下的船体有效功率和螺旋桨有效推进功率绘制到一起，从而得到三种船型的最大航速。模型 1 得到的船体最大航速能够达到 5.5kn，模型 2 得到的船体最大航速能够达到 5.38kn，模型 3 得到的船体最大航速能够达到 5.3kn。通过对比得到在相同主机功率下模型 1 的航速最快，在相同航速下模型 1 的阻力最小，因此可以确定模型 1 的线性阻力最小，因此从 CFD 计算角度来看，线性 1 的船型最优。

根据以上数据对三种船型的航速进行估算，结果如下：

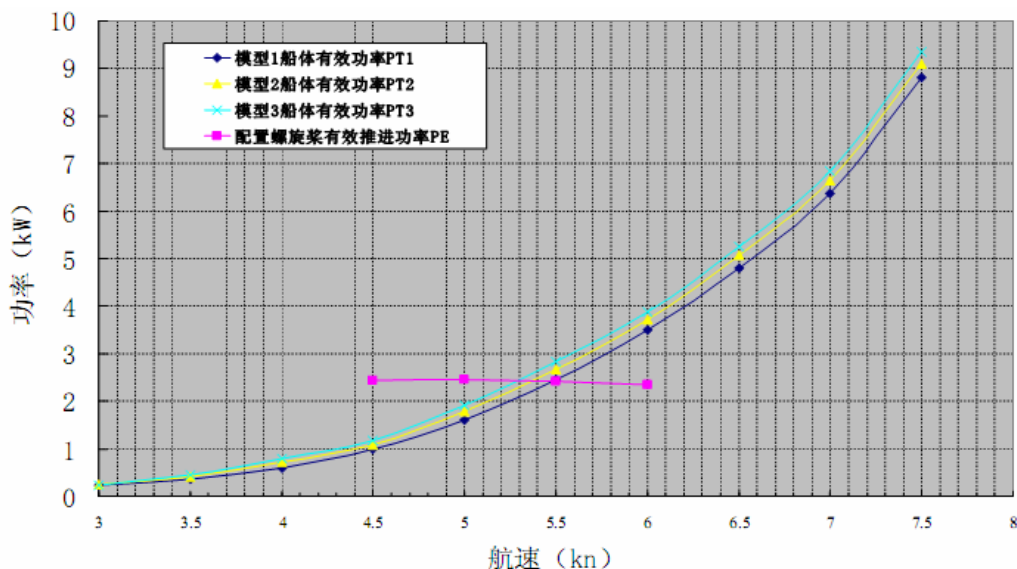


图 3-7 航速估算结果

3.3 船舶稳性衡准的要求

稳性衡准应按照《内河船舶法定检验技术规则 2011》的要求进行，不宜采用简易衡准。装载状态应按照船员实际作业时的装载情况计（包括船员、船舱实际装载重量等）。应保证船舶具备相应航区的干舷（储备浮力），不能超载。船员重心的取值按实际作业状况取，即作业时人员站立且集中一舷。满载全速情况下，应保证船员集中一舷不进水。对船舱应考虑自由液面的修正。

对于三种船型的稳性计算按中国《内河船舶法定检验技术规则 2011》分别对稳性进行计算，详细计算过程如下：

表 3-1 稳性计算总结表

稳 性 计 算 总 结 表

序 号	项 目			满载		空载	
				出港	到港	到港	
1	排水量	Δ	(t)	3.70	3.40	2.40	
2	平均吃水	d	(m)	0.325	0.315	0.230	
3	最小干舷	F	(m)	0.355	0.365	0.450	
4	风压倾侧力臂	I_v	(m)	0.0130	0.0146	0.0273	
5	风压倾侧力矩	M	(m)	0.471	0.487	0.643	
6	船宽	B	(m)	1.800	1.800	1.800	
7	初稳性高度	GM	(m)	0.395	0.413	0.638	
8	d /排水量/初稳性高度			1.195	1.179	1.008	
9	稳性衡准数 < 1.226			满足	满足	满足	
10	$9.81 \times F/B$			1.94	1.99	2.45	
11	稳性衡准数 $< 9.81 \times F/B$			满足	满足	满足	
12	$9.81 \times d/B$			1.7700	1.7170	1.2530	
13	稳性衡准数 $< 9.81 \times d/B$			满足	满足	满足	

三种模型结构都能满足技术规范的稳性要求，三种船型中 3 号模型的稳性最佳，1 号的稳性最差。

3.4 机桨匹配优化设计

关于三种船型的螺旋桨配置说明，通过船型布置图来看，原先考虑的推进系统配置为柴油机通过齿轮箱减速后带动定距桨推动船舶前进，查阅资料得到设计院提供的主机型号为 195，此种型号对应转速应该为 2000rpm，三种船型的设计吃水同为 0.35m，限制了船型配置螺旋桨的直径。通过螺旋桨设计我司一共进行了三种螺旋桨的配置，三种螺旋桨都能够达到航速要求，具体配置如下：

- a) 配置桨叶直径为 0.45m，螺旋桨转速为 800rpm，螺旋桨敞水效率为 0.42；
- b) 配置桨叶直径为 0.53m，螺旋桨转速为 666rpm；螺旋桨敞水效率为 0.52；
- c) 配置桨叶直径为 0.26m，螺旋桨转速为 2000rpm；螺旋桨敞水效率为 0.27。

通过三种螺旋桨的配置，船型航速都能达到要求，前两种配置的螺旋桨转速相对较低，敞水效率较高，也能够完全满足设计院的主机+齿轮箱+定距桨的配置，但是考虑到小型运输船的吃水仅为 0.35m，因此 0.45m 和 0.53m 的桨叶不能够安装到这种船舶上，因此我们最终配置的螺旋桨选择了第三种配置，因此为了达到航速要求，螺旋桨的转速必须达到

2000rpm，也就是螺旋桨转速和主机转速相同，所以为了满足航速要求建议改变推进系统结构，取消使用齿轮箱，才能保证设计的螺旋桨可用。

考虑到太湖流域水生生物丰富，船舶推进在某些航道存在阻力，同时船舶载重比一般小河道大，因此还需提高推进效率，提高螺旋桨转速、提高齿轮箱转速比或采用 1:1 齿轮箱；合理设置艏轴的入水轴线角度，应控制在 10° 以内；不论何种营运状态，螺旋桨叶梢离水面应保证一定的距离；应保证船舶能够倒车。

3.5 综合分析

综合航速计算和稳性计算，得到两组完全矛盾的排名，如何从中选择最可行的方案？首先从船体的性质来看，此次设计的为钢制小型运输船，使用地点为太湖流域，多为内河和湖泊，这种小型运输船对航速要求不是考虑的首位，三种船型结构中航速最优的模型 1 的能够达到的航速为 5.5kn，航速最差的模型 3 能够达到最大航速为 5.3kn，两者之相差 0.2kn 这么微小的航速差别对运输船来说可以忽略；反观稳性情况，由于此种船型为标准化船型，可能会大量运用到太湖流域范围内的河流和湖泊之中，例如钱塘江，船舶行驶过程可能会遇到潮水影响，这对船体的稳性要求较为苛刻，因此从综合方面的考虑稳性考核应该是本次计算的重点，那么模型 3 的稳性性能最佳，因此模型 3 的综合性能最佳。

第四章 内河交通船舶型优化

4.1 优化工具和技术

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 在船舶领域的提出是在 60 年代, 研究者开始相关研究。随着计算机技术的快速发展和 CFD 研究方法的日渐完善, 经过长期发展, 计算船舶流体力学已成为当前船舶性能研究的重要工具, 在造船工业中发挥重要作用, 应用领域也逐渐拓宽, 受到广泛重视。目前已经可以用于概念设计、参数比较、船型优化以及船、桨、舵相互干扰等领域。

4.2 优化的基本原理

一、粘性流体运动控制方程

不可压缩粘性流体流动控制方程可表述为如下微分形式的连续性方程和动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中, u_i 与 u_j 为速度分量, ρ 为流体密度, p 为压力, μ 为动力粘性系数。

上述方程是与时间相关联的, 其所描述的流体运动具有不稳定性并有可能导致湍流出现。上述方程的直接求解法被称之为 DNS (Direct Numerical Simulation), 由于计算强度非常大, 到目前为止只限于一些雷诺数较低的简单流动的控制。在工程应用过程中, 往往要对控制方程作一些近似处理, 目前的通用做法是侧重于计算粘性流体的“平均”流动, 也就是把方程中的变量进行分解, 分为时均量和脉动量, 即

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3)$$

对方程两边进行时间平均, 得出时均连续性方程和相应的 RANS 方程

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (5)$$

方程(4)和(5)中的 \bar{u}_i 、 \bar{u}_j 和 \bar{p} 都为时均量, 也就是不随时间变化, 为简便起见, 时均

物理量上的“—”号被略去。同时，与(2)式相比，(5)式增加了 $\overline{\rho u'_i u'_j}$ ，也就是雷诺应力项，这需要建立湍流模型来封闭方程组。

二、湍流模式

为了使RANS 方程封闭可解，需要遵循湍流的运动规律来建立附加的条件和关系式。基于Boussinesq 假设，雷诺应力可表示为：

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (6)$$

式中： μ_t 为湍流粘度，k 为湍流动能； δ_{ij} 为克罗内克尔(Kronecker)符号，当

$i = j$ 时， $\delta_{ij} = 1$ ； $i \neq j$ 时， $\delta_{ij} = 0$

4.3 优化步骤

本项目采用现代粘性流 CFD 数值技术对小型钢质座机运输船—船型阻力试验进行数值模拟，并进行实船阻力和有效功率预报，主要内容包括以下几个方面：

第一，三维船体几何建模。根据型线图，采用专业前处理软件进行船体几何建模。

第二，数值计算。以船体为中心，确定有效的计算区域，并在船体表面和计算域生成高质量网格，通过数值求解粘性流体控制方程 RANSE，获取流场信息和阻力值。

第三，实船阻力和有效功率计算。通过对数值模拟得到的模型阻力结果进行三因次换算，得出相应航速下实船的总阻力值以及所需的有效功率。

一、实船和船模主要要素

用于数值模拟的船模尺度相对实船尺度按缩尺比 $\lambda = 1:2$ 的比例选取，船模与实船的船型要素见表1：

表4-1 船模与实船的船型要素

说明	船长 Lpp/m	船宽 B/m	吃水 d/m
实船	9.20	1.88	0.35
船模	4.6	0.94	0.175

二、船体模型

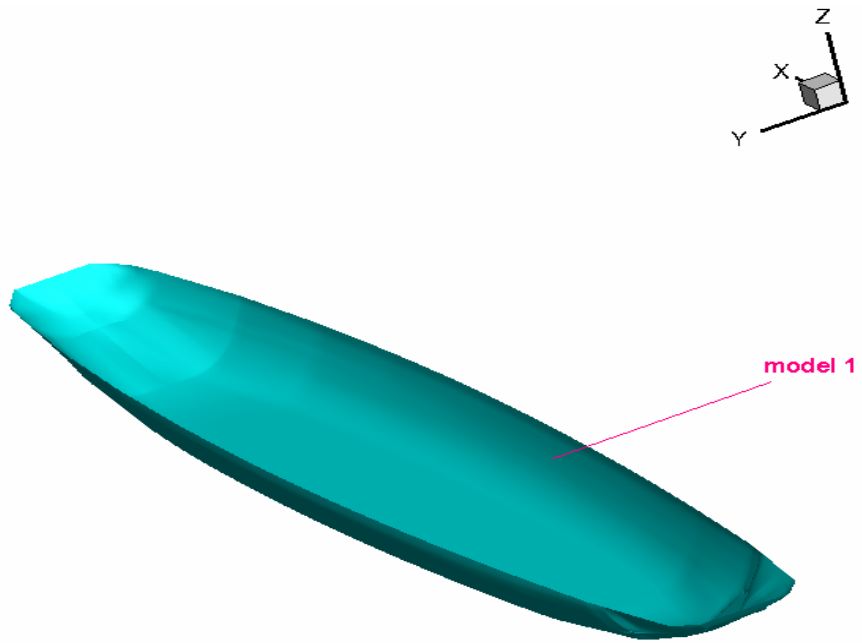


图 4-1 小型钢质座机运输船船型 1 三维模型

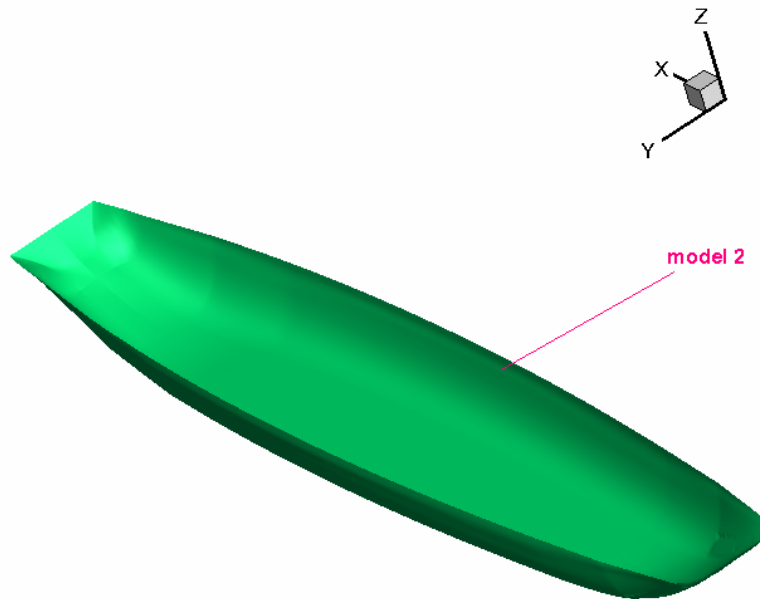


图 4-2 小型钢质座机运输船船型 2 三维模型

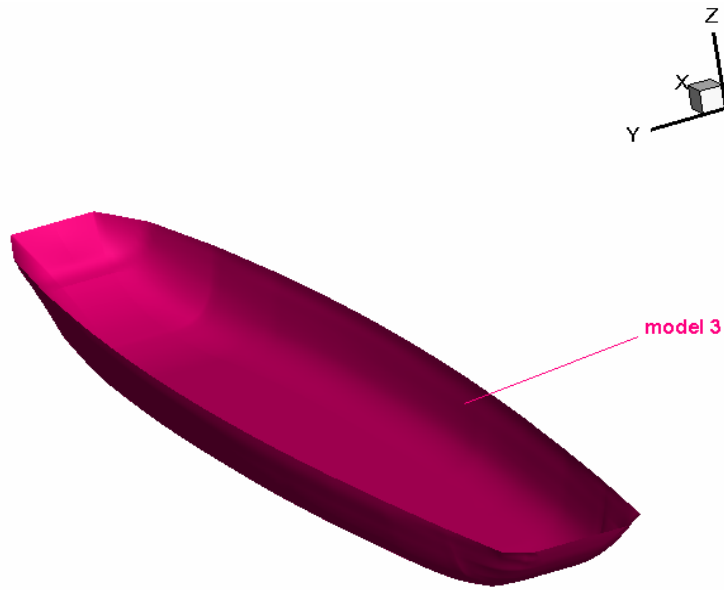


图 4-3 小型钢质座机运输船船型 3 三维模型

三、数值仿真工况

本计算书主要针对设计吃水工况下进行阻力计算机仿真计算。

1. 流体参数

温度：20℃，密度：998.2kg/m³，运动粘度：1.00374m²/s

2. 计算航速

数值模拟基于付汝德相似准则，付汝德数 (Fr) 为相似准数。对模型以 5 个速度航的阻力和粘性流场等特性进行数值模拟，相应的速度参数如下表 2 所示 (表中 Vs 为实船航速，

Vm 为模型航速， $Fn = \frac{Vm}{\sqrt{gLm}} = \frac{Vs}{\sqrt{gLpp}}$ 为付汝德数)。

表 4-2 船体模型运动速度与对应的实船速度

Fr	船模速度 Vm(m/s)	实船速度 Vm(m/s)	实船速度 Vm(knot)
0.16	1.091	1.543	3
0.27	1.819	2.572	5
0.38	2.546	3.601	7
0.49	3.274	4.629	9
0.60	4.001	5.658	11

三、流体控制域的建立

根据船体型线特征建立船体模型并选定计算区域，如图 4-4 所示，控制域网格划分如图 4-5 所示，船体区域网格划分如图 4-6-图 4-8 所示：

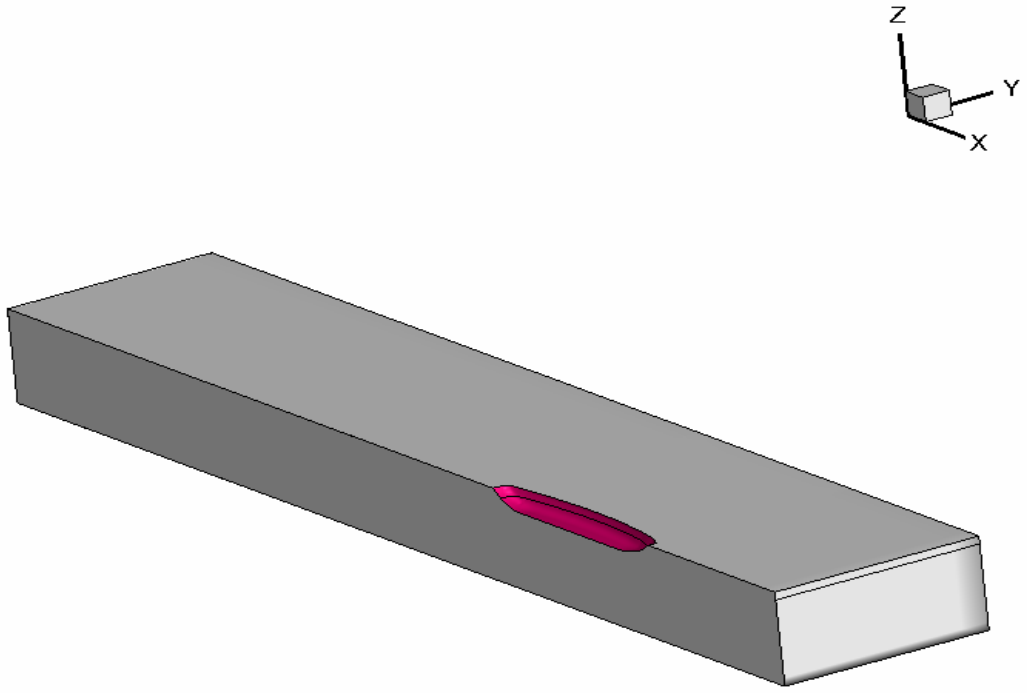


图 4-4 计算区域

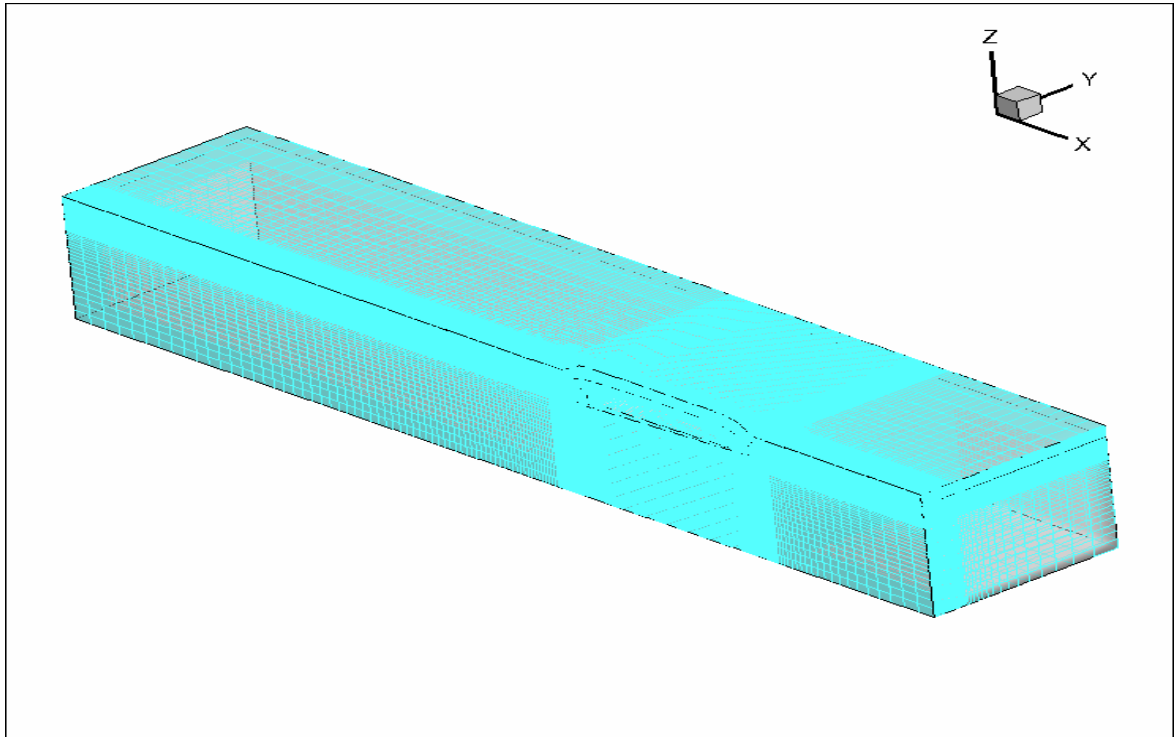


图 4-5 计算区域网格划分

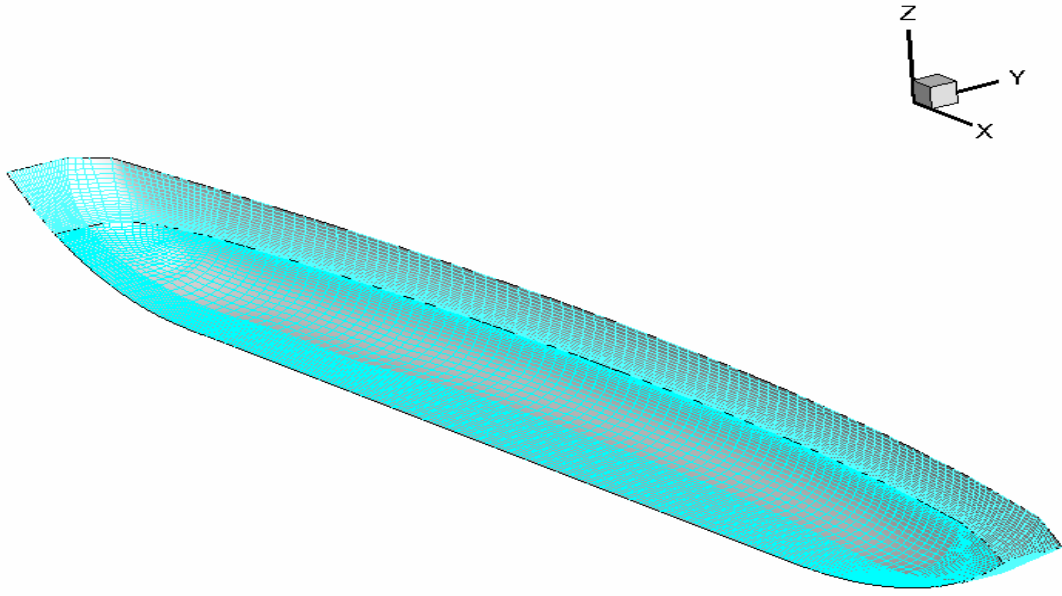


图 4-6 船体网格划分

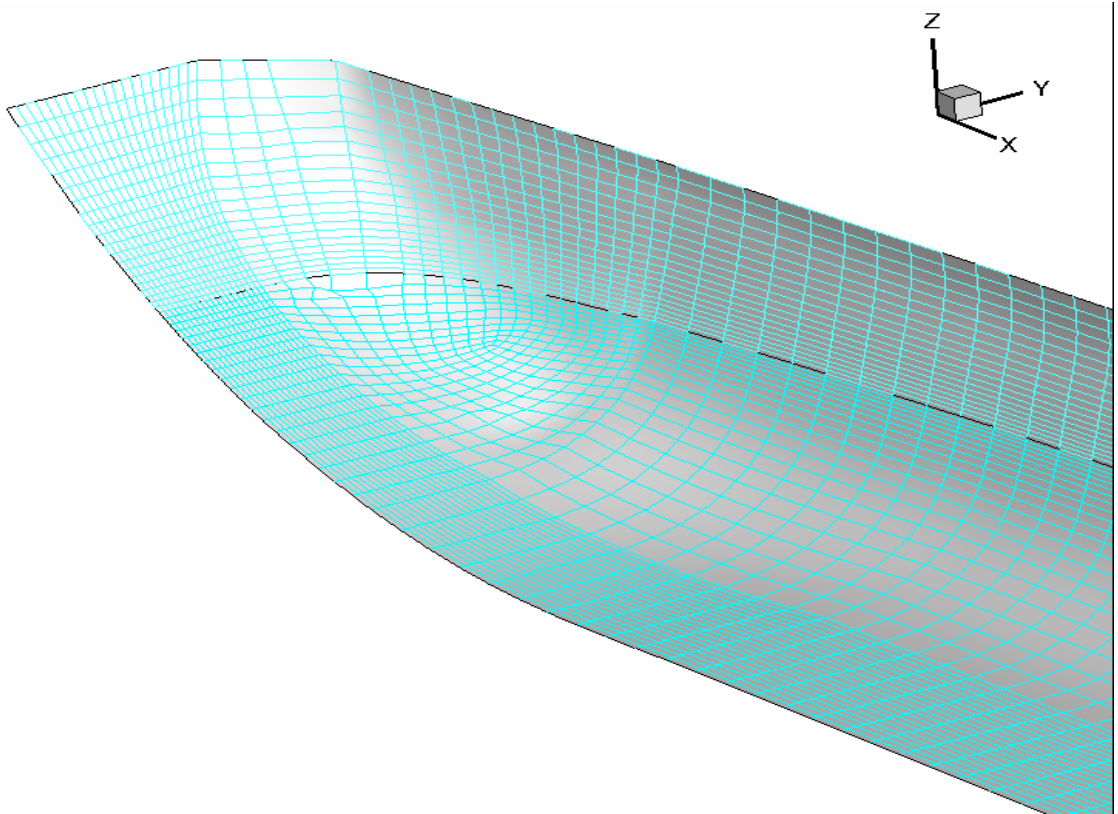


图 4-7 船体尾部网格局部放大示意图

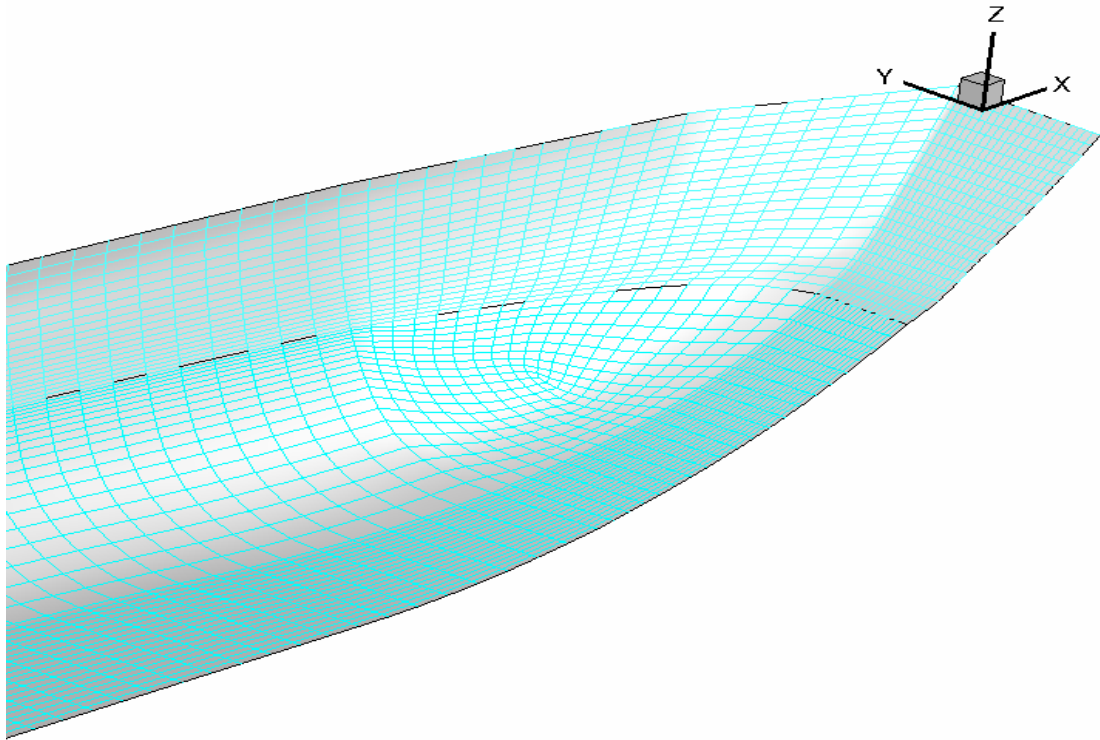


图 4-8 船体首部网格局部放大示意图

4.4 优化结果与数据分析

一、计算结果

根据三种不同剖面的型线图，建立船体水动力模型，设计水线以下的船体湿表面积 S_1 、 S_2 和 S_3 分别为 1.924m^2 、 2.029m^2 和 2.071m^2 ，根据ITTC(1995)制定的摩擦阻力经验公式 $f = 0.075/(\lg \text{Re} - 2)^2$ ，将数值计算的结果分别与之进行比较，如表4-3和表4-4所示：

表4-3 船模摩擦阻力系数数值计算结果

Fr	ITTC(A)	Model 1	Model 2	Model 3
0.16	3.498E-03	3.495E-03	3.447E-03	3.479E-03
0.27	3.186E-03	3.212E-03	3.174E-03	3.198E-03
0.38	3.002E-03	3.031E-03	3.014E-03	3.035E-03
0.49	2.875E-03	2.907E-03	2.900E-03	2.917E-03
0.60	2.779E-03	2.811E-03	2.811E-03	2.828E-03

表4-4 船模摩擦阻力系数数值计算值与经验公式比较

Fr	(Model 1-A)/A	(Model 2-A)/A	(Model 3-A)/A
0.16	-0.10%	-1.45%	-0.55%
0.27	0.83%	-0.35%	0.38%
0.38	0.96%	0.41%	1.09%
0.49	1.10%	0.87%	1.47%
0.60	1.14%	1.14%	1.76%

从表4-4中可以看出，摩擦阻力的数值计算结果最大误差控制在2%以内，说明所选用的

湍流以及本文所采用的计算网格满足精度要求，该数值计算结果可信。

采用上述数值计算方法计算的摩擦阻力、粘性压差阻力和总阻力计算结果分别如表4-5、4-6和4-7所示，由于目标船型主要在内河流域进行作业，根据内河流域的水域特性，摩擦阻力在总阻力中占据较大的比重，因此在本文计算中不考虑船舶兴波阻力进行数值计算，从表中可以明显看出，在低速时船型1的总阻力相对于船型2和船型3分别小5.52%和9.69%；在船舶中高速时，船型1的总阻力相对于船型2和船型3分别小4.58%和9.18%；分析其原因，在低速时，船舶摩擦阻力在总阻力中占据主导地位，而由于模型3的湿表面积最大，所以其模型3的摩擦阻力明显增加；在高速时，摩擦阻力相对于减少，粘性压差阻力增加，导致高速时模型1总阻力相对于船型2和船型3的减少比例少于低速时减少的比例。因此在本文的计算中，从阻力数值计算效果上来比较，船型1的阻力最优。

表4-5 船模摩擦阻力模型数值计算结果（单位:N）

Fr	model1	model2	model3
0.16	7.99	8.31	8.56
0.27	20.41	21.28	21.88
0.38	37.73	39.58	40.67
0.49	59.84	62.97	64.65
0.60	86.42	91.16	93.61

表4-6 船模粘性压差阻力数值计算结果（单位:N）

Fr	model1	model2	model3
0.16	2.29	2.57	2.83
0.27	5.99	6.54	7.23
0.38	11.49	12.35	13.65
0.49	18.63	19.68	21.81
0.60	27.39	28.11	31.70

表4-7 船模总阻力模型数值计算结果（单位:N）

Fr	model1	model2	model3
0.16	10.28	10.88	11.39
0.27	26.40	27.82	29.10
0.38	49.22	51.93	54.32
0.49	78.47	82.65	86.46
0.60	113.81	119.27	125.32

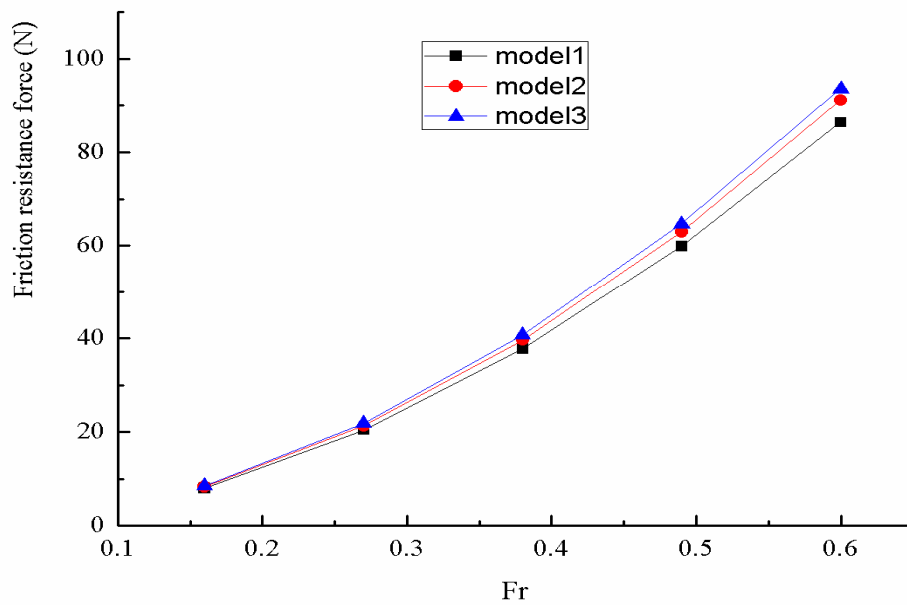


图4-9 模型1、2和3计算船模摩擦阻力比较图

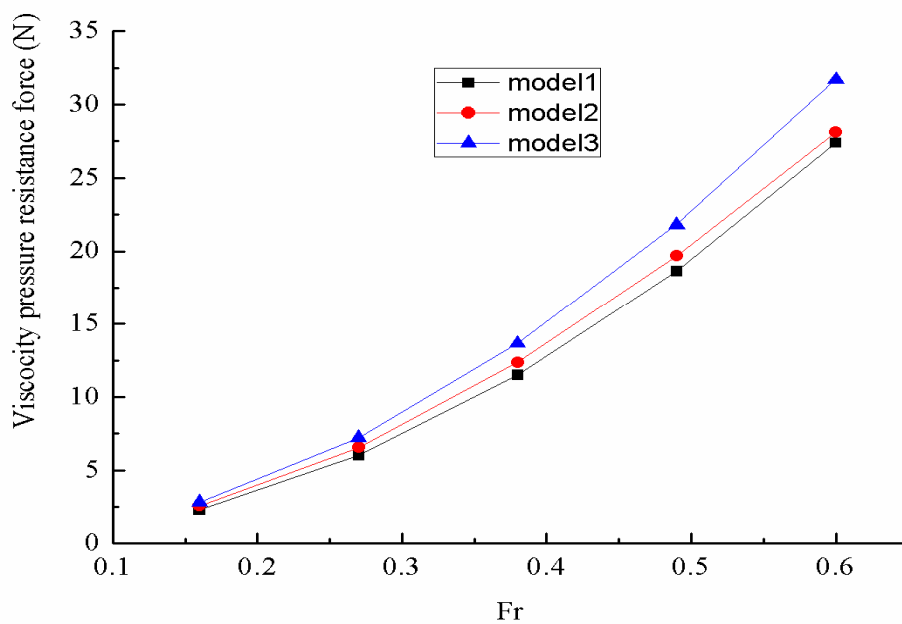


图4-10 模型1、2和3计算船模粘性压差阻力比较图

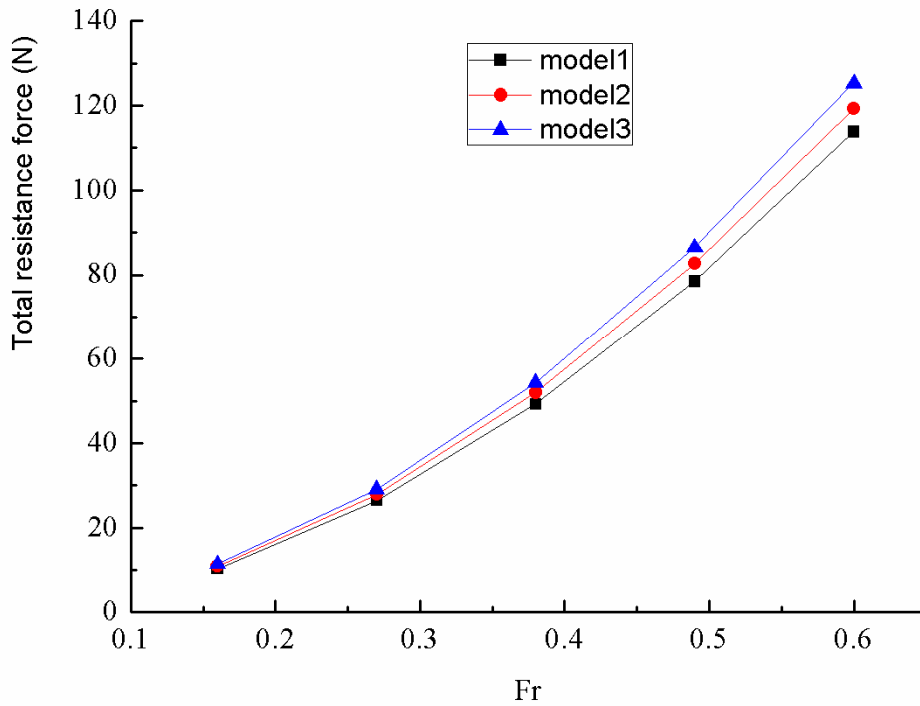


图4-11 模型1、2和3计算船模总阻力比较图

二、计算结果分析

根据上述数值计算结果，在本章中进行船体功率预报，其有效功率值见表4-8所示以及图4-12所示，由于本船事先给定的主机功率为12hp， $P_c=12*0.735=8.82\text{KW}$ ，按10%的储备功率，结合本文所给的曲线，按轴系效率98%，齿轮箱效率96%，船身效率100%，螺旋桨敞水效率60%，进行插值计算得到，船舶设计航速1型约为6.75节，2型6.70节，3型6.27节，结合实际船舶表面的粗糙度以及相应附体的增大的摩擦力，所以该船的实际航速还将降低。

表4-8 实船有效功率数值计算结果

说明	Mode 1	Mode 2	Mode 3
V(knot)	P(KW)	P(KW)	P(KW)
3	0.11	0.12	0.21
5	1.22	1.28	2.05
7	5.48	5.75	7.64
9	22.62	23.72	27.02
11	80.63	84.52	88.38

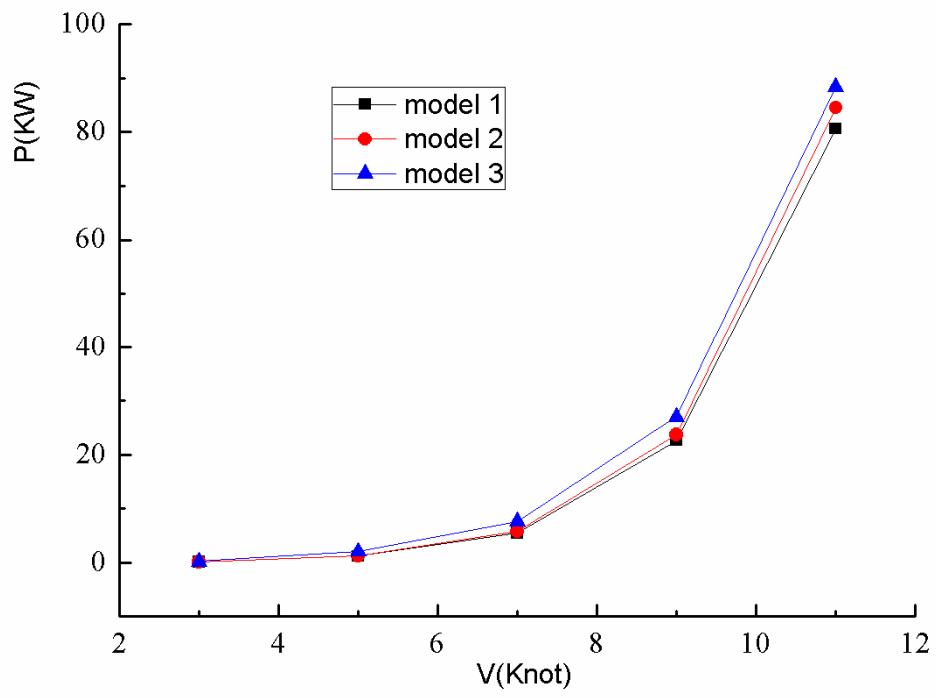


图 4-12 模型 1、2 和 3 计算船模总阻力比较图

第五章 船型优化的评价

5.1 技术评价

要设计出技术先进、性能优越、节能低耗、适合当前运输业及相关产业生产需要的船型并对船型加以优化，编制内河标准运输船船型图册，供运输企业选择采用。

以上船型的设计优化中充分考虑了以下要点：

- 1、对干舷的限制，实质上不仅是货物的限制，而且对载人数量的限制。
- 2、对不沉性的要求，对钢质运输船必须设置浮力舱。
- 3、对环保的要求，内河运输船防污染问题要予以考虑。
- 4、应从实际考虑运输船夜航生产的问题，满足对信号灯的配备要求。
- 5、对具有甲板室的船舶，应配备救生圈。
- 6、通讯设备的配备，必须配备能联系上的手机或其它有效设备。
- 7、船舶在满载全速回转情况下，船员集中一舷必须保证不进水。
- 8、主要船用产品：主机、齿轮箱或离合器、救生设备应为船检部门认可产品。

9、优化设计不是对现有船舶简单的测绘、克隆，主尺度确定、型线设计应建立在现实的基础上，但要优于现实。

10、对于中剖面系数，取值在什么范围才是最安全最经济的，主要应考虑①人在船上摇晃的程度和感觉；②满载全速回转、船员集中一舷不进水；③航速的降幅，增加中剖面系数，航速下降了多少，性价比要综合分析比较。建议选一个代表性的船型，设置“瘦、中、肥”等三个中剖面系数，进行CFD论证，取得船型优化设计的技术支撑。

11、对稳性核算软件，计算公式与《内河船舶法定检验技术规则 2011》一致的，可以采用软件计算，公式不一致的应改为手算。若能说明两种计算方式结论差别的，应予以说明经同意后予以采用。对“运输中”工况的校核，如已有计算更差状态下的稳性校核，可以免于核算，但应有文字说明。

需要进一步考虑和完善的技术要求：

1、考虑不同水域对尺度的要求，如太湖水面与钱塘江中下游船型材质，以钢质为主，同一水面设计多个船型时，以船长为标准，2个船型间的长度差距不少于3米；但分布在不同江河段的船型，没有尺度差距的要求。

2、考虑滚塑在设计和优化中的技术要求，如在千岛湖、钱塘江上游、钱塘江中下游、紧水滩、杭嘉湖绍河道各选1个滚塑技术船型，目的为解决“以塑代木”的发展目标与趋势，按滚塑船舶相关技术与规范要求组织设计。

3、对于小型运输船尤其一些木船，在传统船型以木质为主的区域，重点以规范肋距、船板厚度等结构强度，完善消防救生设备配置等内容，并按内河运输船规范要求，明确相关建造工艺要求。

4、船舶动力要求选用低噪音、节能的柴油机，或使用低压电力推进。

5、对于以上考虑的技术要求中，有必要建立典型船舶稳性资料库的工作以消除船舶安全隐患、完善船检档案，但建立稳性资料管理工作还需要进一步细化和完善。如船舶作业类型、船舶两柱间长LPP和型深D的数据应列入参照汇总表内。同作业类型、同主尺度可确认为其中1艘为典型船型，不同作业类型的船舶不能归并在一起；典型船型应选择参照

对象船舶中主尺度最小的船舶，参照对象船舶的型宽不能小于对应的典型船型的型宽；典型船型的型宽区间建议设 20cm 为一挡，区间设定应为 \geq 下限、 $<$ 上限（例：型宽为 5.0m 的典型船型，其型宽区间应设定为 $\geq 5.0\text{m}$ 、 $< 5.2\text{m}$ ，则型宽在 $\geq 5.0\text{m}$ 、 $< 5.2\text{m}$ 区间的参照对象船舶都能适用型宽为 5.0m 的典型船型的稳性资料）。

总体来说以上的设计和优化在技术层面来评价具有一定的科学性、实用性和经济性。

5.2 政策评价

一、对于船型优化的认识

对内河运输船进行标准化船型优化设计，是从根本上增强内河运输船抗风险能力，提高运输船经济效益，减少能源消耗，并促进相关产业稳定、健康、可持续发展的有效措施之一。因此，内河标准运输船船型的设计和优化中应体现安全性、经济性、适用性、环保性、节能性，不断提高内河运输船的现代化水平。

二、船型设计及优化的工作绩效

新世纪伊始，就开始组织开展内河船舶标准船型研究与优化设计工作。这项工作得到了相关政府主管部门的高度重视，并列入政府主管部门工作计划中，在太湖流域各省市范围内开展内河船舶船型标准化工作，并与有关船舶设计单位联合开展标准船型研究与优化设计工作。至 2009 年底已完成长江航道、太湖航道、千岛湖航道等 3 个系列的多个标准船型的研究与优化设计，部份船型已建造了大批量的船舶，其优越性在生产实践中得到了充分的验证与肯定。

坚持以“先进性和经济性相结合的工作原则”，确定以抓源头、抓基础、抓优化、抓标本兼治为工作重点（抓源头：是通过抓船舶设计单位的资质管理，促进船舶设计单位的素质、能力、水平的提高；抓基础：主要是抓船舶的船型基本要求、图纸基本要求、设计基本要求，不断提高船舶的标准化、规范化程度；抓优化：是以通过船型优化设计，不断提高船舶的技术含量、安全性与经济性指标；抓标本兼治：是指新建船舶严格按标准图纸施工，现有船舶按标准船型的要求逐步完成整改）。通过船型研究与优化设计，船舶图纸资料的补充、船舶设施改造、及航区与作业时间的限制等工作，对全省重点（高危）作业船舶，逐年逐类开展船型研究与优化设计，逐步实现船型与图纸资料的标准化与规范化管理，达到“安全、经济、实用、卫生”的总目标。

在具体的船型优化设计中也确定了工作重心：（1）通过优化、改善船体线型，优化机桨匹配设计，完善船舶通讯、导航设备，加强防火隔离等，全面提高船舶安全性和经济性；（2）强调改进船舶技术装备，改进船舶防污染装备、提高船舶节能、环保性；（3）加大船舶卫生设施改造，改善船员居住、生活条件、改善船舱卫生设施，提高水产品初级卫生安全。

从政策角度看船型的设计优化确实给该流域的船舶运行带来了实实在在的成果。

第六章 结束语

运输业是我国经济的支出行业，也是其他产业发展的重要基础。内河运输尤其是主干河道的运输对周边经济的发展是至关重要的。保证水运的安全和船舶的适航就依赖船舶设计的科学性、实用性和经济性。如何优化内河船型的设计成为内河水运和经济发展的重中之重，因此需要对船型的设计优化进行研究，完善船型的优化设计思路、技术要求变得尤为重要

尽管本文对于对优化和设计内河运输船的船型发表一些想法，得出了有意义的结论，但是由于时间、篇幅与本人研究水平有限，数据保密性的限制，获取翔实数据的难度较大，本文尚存在着许多的不足。

由于获取相关数据较为困难，本文选取的模型的精确性与准确性还有待提高。在后续的学习中可以尝试寻找更为准确的模型对优化设计进行体现。

参考文献

- [1] 杨立敏.船舶胜览[M].中国海洋大学出版社,2011.
- [2] 姜文英, 林焰等. 变量化船舶型线表达与设计方法[J].《上海交通大学学报》,2013 (2) .
- [3] 马中亚. 船舶总布置设计评估方法研究[D]. 哈尔滨工程大学,2008.
- [4] 王言英. 船舶 CFD 及其在船舶设计中的应用[J].《国际学术动态》,1997 (2) .
- [5] 何良德, 姜晔等.内河船舶跟驰间距模型[J].《交通运输工程学报》,2012 (1) .
- [6] 张依莉,王国平内河 18 米测量(巡检)快艇船型设计[J].《船舶工程》,2010 (6) .
- [7] 韩立宪.浅谈内河船舶总体布置原则 [J].《中国水运(下半月)》,2010 (2) .
- [8] 张海泉.造船 CAD/CAM[M].哈尔滨工程大学出版社,2007.
- [9] 于全虎.江苏内河船型用于尼罗河航运的前景[J].《江苏船舶》,2007 (6) .
- [10] 林焰, 纪卓尚, 陆从红.船舶设计中的三维参数化技术[M].国防工业出版社,2007.
- [11] 《船舶设计使用手册》编辑委员会.船舶设计手册-总体分册[M].中国交通科技出版社,2007.
- [12] 刘科峰.船舶型线建模系统的研究[M].哈尔滨工程大学,2005.
- [13] 盛振邦, 刘应中.船舶原理[M].上海交通大学出版社,2003.
- [14] 王前进, 饶小江.对内河船型标准化工作的思考[J].《交通科技》,2001 (4) .

谢辞