

上海交通大学

硕士学位论文

小水线面双体船方案设计及稳性研究

姓名：徐蓉

申请学位级别：硕士

专业：船舶与海洋结构物设计制造

指导教师：何炎平

20051201

## 小水线面双体船方案设计及稳性研究

### 摘 要

小水线面双体 (Small Water-Plane-Area Twin Hull, SWATH) 船的设计产生于 20 世纪初期。1905 年, 美国的船舶工程师 Nelson 运用“两个潜体”的思想设计成第一艘小水线面双体船。1932 年, Faust 随后也提出了小水线面双体船概念的初步设想, 经过不断完善, 形成了现在完整的船型概念。

小水线面双体船概念的提出为研究与解决日益复杂的航行海况要求开拓了新思路, 这种船型兼容了潜艇、水翼艇和双体船的许多优点又克服了这些船相应的缺陷。该船型以其适航性优良、稳性良好、甲板面积大、易于平行停靠码头等诸多优势, 日益引起国际造船界的浓厚兴趣, 成为综合性能比较优秀的新船型。

中国从事船舶技术开发的技术人员经过三个五年计划的技术攻关, 已全面掌握了小水线面船技术, 取得了具有世界先进水平的科研成果, 形成了一套完整的“小水线面船工程技术系统”。论文就是在此背景下, 依托上海交通大学海洋工程国家重点实验室的项目——“双体小水线面水翼复合型高速船 (HYSWATH) 船型研究”, 结合国内外小水线面双体船的最新研究进展, 对一小水线面双体船的方案设计、稳性性能、纵向运动稳定性和结构设计进行分析和研究:

#### 1) 小水线面双体船的方案设计

根据总布置、结构、操作管理、建造等各方面的要求, 结合国

内外研究开发成功的小水线面双体船船型特点，提出了小水线面双体船的方案，并依次开展了主体尺度要素确定、主体和支柱型线设计及光顺、主体尺度和布局要素确定、总布置设计、重量重心估算等工作，并考虑其营运过程中的具体特点，进行了舱室划分，为后续的性能和结构研究提供一个明确的研究对象。

本文利用船舶设计中通常采用的母型法，并根据一些统计资料总结出一套适用于小水线面双体船型的空船重量在初步设计中的估算方法，通过对国内外设计制造的多艘小水线面双体船的主体要素及其线型、总布置、推进方式等各方面的特征进行统计分析，确定出该小水线面双体船的主体主尺度和船型参数以及相应的线型。

## 2) 小水线面双体船的稳性研究

本文在对小水线面双体船进行稳性研究时，将其分成完整稳性和破损稳性两部分各自予以讨论，并进行详细分析。稳性计算采用 HYDROMAX 软件进行，分别分析在完整状态（未破舱）及一个舱室破损进水后的稳性特点，最后根据中国船级社（CCS）、国际海事组织（IMO）、美国海军的相关稳性要求进行全船完整状态下稳性的校核。

## 3) 小水线面双体船的纵向运动稳定性研究

小水线面双体船的水线面积与相当排水量的常规单体船或双体船相比是很小的，其纵向静复原力矩也很小，所以它对于引起垂荡和纵倾的外干扰力的抵抗能力较弱，纵向运动（纵摇、垂荡运动）一般是不稳定的。因此，当航速达到一定值之后，就必须研究它在

纵向平面内的运动（简称为纵向运动）的稳定性问题。基于此，论文在小水线面双体船型的运动稳定性方面，根据前人研究的结果，主要讨论了以下几个问题：

（1）静水中，小水线面双体船型的纵向运动稳定性

- a. 纵向运动稳定性特征方程及其求解；
- b. 纵向运动的三个特征参数；
- c. 对纵向运动稳定性进行了定量的计算。

（2）迎浪航行时，小水线面双体船型的纵向运动稳定性

- a. 纵向运动特性；
- b. 纵向运动消减的最优控制。

4) 小水线面双体船的结构初步设计和分析

本文最后一部分对小水线面双体船开展结构初步设计和分析。首先借鉴国外相关资料进行该船典型横剖面结构型式设计，并按照中国船级社的相关规范初定出结构型式和材料。

对于小水线面双体船这种新高速船型，结构初步设计应当充分借鉴国内外相关船型的设计经验，不妨先暂且按照规范选取构件尺寸，再通过详细有限元分析考察结构设计的合理性并提出改进优化意见，但本文并未对其展开有限元分析，因此在后续工作中，尚有很大空间可以研究。

本文通过对一型小水线面双体船开展总体性能和结构分析方面的初步研究，总结出一些有意义的结论，希望本文工作对将来深入研究开发小水线面双体船船型具有一定的参考价值。

---

关键词：小水线面双体，SWATH，高速船，方案设计，稳性，稳定性，  
结构分析

---

## CONCEPTUAL DESIGN AND STABILITY RESEARCH OF A SWATH VESSEL

### ABSTRACT

The Small Water-Plane-Area Twin Hull (SWATH) configuration was initially introduced early in the 20<sup>th</sup> century. In 1905, Nelson, an American naval architect, designed the first SWATH all around the world applying the idea of *two lower hulls*. Subsequently, Faust put forward the preliminary plan on the conception of SWATH in 1932. After uninterrupted improvement, it has been developed to recent fine condition.

The presentation of conception of SWATH expanded the new train of thought on researching and solving the increasingly complicated navigation problems. The SWATH not only assimilates many strongpoints of submarine, hydrofoil and catamaran, but also overcomes their respective defects. With the outstanding advantages including excellent seakeeping characteristics, improved stability, enlarged deck areas and convenient parallel mooring, the SWATH configuration has aroused great interest of naval architects in international shipbuilding circle and become a new type of vessel with favorable comprehensive performance.

After 15 years of research and tackling the problems, the technical

personnel being engaged in shipbuilding in China has mastered the technique of designing and building SWATH, achieved great accomplishment with advanced world level and formed a complete technological system *The Engineering and Technological System on SWATH*. With the combination of overseas latest research advancement and the aids of foundation project for Shanghai Jiao Tong University's Marine Engineering State Key Laboratory, *Research on the Ship Form of HYSWATH*, it is analyzed and discussed about the conceptual design, stability, longitudinal movement stability and structural design of a SWATH Vessel in the paper. As described in the paper, a series of research work have been conducted to validate the performance of SWATH Vessel.

#### 1) Demonstration on the conceptual design

Firstly, according to the requirements of general arrangement, structure, operating management, construction and etc, the paper finished the preliminary design for a SWATH Vessel including determination and optimization for principal characteristics of the hull, design and fairing of lines, determination for dimensions and positions of lower hulls, general arrangement design, weight and center of gravity calculation using the domestic and overseas successful examples as reference. Furthermore, the design studies determined the way of tank compartmentations. All these work aim at providing an objective for the following detailed research.

It is summarized in the paper that the mother-hull method is used to

introduce a favorable estimation way applied to calculation for weight of the light ship. The dimension of main hull and form geometries and lines are optimized based on analyzing major characteristics, lines, general arrangement and propulsion way of domestic and overseas SWATHs.

## 2) Research on the stability performance

With statics method, this paper presents some research work on the stability characteristics dividing it into intact stability and damaged one. The calculation is conducted with the software HYDROMAX, it analyzed the stability under intact condition and that in the condition of flooding respectively. Finally, the intact and damaged stability are checked in terms of CCS, IMO and U.S. Navy's related rules.

## 3) Research on the longitudinal motion

Thirdly, the smaller water-plane-area of SWATH comparing to the general monohull or catamaran with corresponding displacement contributes to its weak capability to resist the forces which will cause sway, trim and unstable longitudinal motion. Upon the certain velocity it is necessary to analyze its longitudinal motion. Therefore the paper discussed the following aspects on the basis of the accomplishment achieved before:

### (1) The longitudinal motion in static water

- a. Determination and resolution of longitudinal motion equation;
- b. Analysis of three characteristic parameters of longitudinal motion;
- c. Quantitative calculation of longitudinal motion.



---

(2) The longitudinal motion when sailing forward the sea

- a. Analysis of longitudinal motion trait;
- b. Optimization control on the deduction of longitudinal motion.

4) Design and research on structure

The last part of this paper focuses on the initial structural design and analysis of the SWATH Vessel. At first, the form of typical transverse section is designed using foreign materials for reference and the scantlings and materials are determined according to CCS rules.

Concerning to SWATH, a new kind of high speed vessel, its structural design should be developed with reference of domestic and overseas SWATHs. It is advisable to determine the scantlings in accordance with rules, and afterwards, to evaluate the feasibility of the structural design and put forward the further suggestions after FEM analysis. However, the paper doesn't include the Finite Element Analysis which is of significance for the further research.

To sum up, this paper has performed a series of research work including conceptual design and structural analysis and drawn some useful conclusions. It is expected to be helpful for further research and development of the SWATH design.

**KEY WORDS:** SWATH, high speed craft, conceptual design, stability, structural analysis

上海交通大学

学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：徐 蓉

日期：2005 年 12 月 27 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： 徐蓉

指导教师签名： 何炎平

日期： 2005 年 12 月 27 日

日期： 2005 年 12 月 27 日

## 第 1 章 绪论

### 1.1 引言

随着单体船的日益大型化和发展,各种特殊船型开始如雨后春笋般地出现,船舶研究领域的内容也日益丰富和深刻,各种高性能船型不断涌现。所谓高性能,是指在机动性(快速性、回转性、反应能力、适航性等)、两栖性(空海两栖、海陆两栖、浅吃水、越障能力)、隐身性(形隐身、声隐身、光隐身、电磁场隐身、电磁波隐身等)、适居性(摇摆的缓和性和平台的稳定性)、安全性(生命力强,抗沉性好,防火、救援能力佳)、适用性(可承受性高、操作维修简便、支援保障容易,效费比高,寿命长,军民兼用)等方面具有优越的性能。高性能船型因其良好的机动性、隐身性、适居性、安全性和适用性,作为 21 世纪最有前途船型,将在军、民两用方面发挥极大的潜力。

高性能船按照船的流体力学支承原理来划分,可以分为水浮力型、水动升力型、气垫压力型、空气动升力型和复合型等五类高性能船。

#### (1) 水浮力型高性能船

这种高性能船虽与常规排水量船相似,利用水的浮力支承船的重量,但为减少水的阻力和波浪的干扰,其船体形状(因而浮力分布)不同于甚至大大不同于常规船。属于这种高性能船的有圆舳型船、深 V 型船、高速双体船、穿浪双体船和小水线面双体船等。

#### (2) 水动升力型高性能船

利用高速运动的滑行面或水翼所产生的水动升力支承船的重量,其优点是升阻比高。滑行艇和水翼船就是这种类型的船。

#### (3) 气垫压力型高性能船

依靠船底下封闭气垫的静压力,把船体抬离水面以减少水的阻力。这种高性能船称为气垫船,主要分全垫升气垫船和侧壁式气垫船两种。

#### (4) 空气动升力型高性能船

这种高性能船就是地效翼船,它凭借其翼化船身贴近水面高速运动时产生的水面效应,获得很高的气动力升阻比,能作超高速贴水(但不触水)航行。

#### (5) 复合型高性能船

将上述两种(或多种)流体力学支承原理加以复合而形成的新型高性能船,它兼有原型之长,而无原型之短,如水翼双体船、水翼潜体船、气垫双体船、单体小水线面水翼复合型高速船、小水线面中体五体船等。

各种高性能船由于采用的流体力学支承原理不同而具有不同的特点。例如地效应船的超高速全垫升气垫船和地效应船的两栖性,自控深浸水翼船和小水线面双体船的优良耐波性等等。正因为如此,各种高性能船也有各自的不足之处,在进行方案设计时必须对航行水域环境、使用要求、技术现状等关键问题进行综合权衡和全面考虑,实事求是、扬长避短地选择最合适的船型。从这个角度讲,将两种或多种船型原理杂交而成的复合型高性能船,博采了各家之长,克服了各家之短,是近代高性能船的发展方向,是 21 世纪极有希望的新船型。

因高性能船具有高航速、高适航性、高可用性、作业甲板面积大、军民兼用、高效费比、高隐身性、高舒适性等特点。小型作战舰艇将会逐步选用适当

高性能船型或混合船型,使之在不同的战斗中能大型军舰相抗衡或在复杂海域、海情条件下与高技术武器协同交战,充分发挥自身高效作战能力,并且具有很强的生存能力;在机动性、兼容性、可用性、隐蔽性、居住性等“二力五性”的综合优化上都将出现从量变到质变的飞跃。未来大中型军舰为追求高性能,势将有突破传统船型,采用新概念,选用合适的高性能船型的趋势;同时,高性能船是解决海上高速运输的船型。总之,在未来的海上争夺中其将占有重要地位。

由于近来集装箱快速跨洋运输,军事物资快速运输,各国在近海或沿海航运中不断增加乘客和车辆航渡服务,高速船呈现出向大型化、商业化发展的显著趋势。其中,超细长多体船型SSMH(Super Slender Multihull)作为拥有较大甲板面积和容量的排水量船型,已日益引起国际造船界的广泛关注和重视。

各种船型有着各自不同的特点,于是有各自的应用领域,要求十全十美是不切实际的。

优化高速海洋运输工具船型的事业发展,不单从水动力着手设计,而且从结构、营运性和最终的经济效益进行考虑。高速船的开发需要我们不断努力以降低船舶阻力,尤其是兴波阻力,同时也要考虑其耐波性能。通常,稳性性能对于高速船来说,即使在其完整状态下也是一个重要的设计瓶颈。另外,当船舶搁浅、发生碰撞时,其破损稳性更加重要。似乎,在某些方面多体船不及单体船,尤其是单体船具有较小的湿甲板面积,并且在相当排水量下,单体船的结构重量要轻些,这些因素都要在设计时考虑到。对于高速多体舰船的研究在将来必将掀起热潮。

对各种多体船如双体船、三体船和五体船的研究和开发已经成为不少著名国际学术会议如船舶与海洋工程会议(SNAME)、高速海洋运输会议(FAST)、国际船舶结构会议(ISSC)、意大利船级社(RINA)、国际船舶实用设计大会(PRADS)、新船型和海洋技术(NewS-Tech)会议等的热门讨论专题。

从长远看,由于我国海岸线漫长,岛屿众多,江河湖泊密布,而这些水域情况各具特点。同时,各地经济都在发展,对水上高速客运的需求呈上升势态,这给各种高性能船以发展机会,不论是气垫船或是水翼船、双体船或单体船、小水线面双体船或穿浪船等,都有可能得到重视和发展。沿海水上高速客运要得到更快、更好、规模更大的发展,在很大程度上或者说主要取决于高性能船舶船型本身的技术发展水平。

为了满足所谓“全海候”航行的要求,以及日益复杂的航行海况要求,通常采用两种方法来提高耐波性:一种简单的方法是增大船的主尺度,但是这样会大大提高船的建造成本和营运费用,在经济性方面存在不足。第二种提高耐波性的方法是在船体设置减摇设备,如消摇鳍、防摇水舱等。这样做无疑也会增加船的造价和营运维修费用,而且现有的减摇设备主要应用于消减横摇,对消减纵摇还存在不少困难。在这样的船舶制造需求下,小水线面双体(Small Water-Plane-Area Twin Hull, SWATH)船概念的提出为这一问题的研究与解决开拓了新思路。

小水线面双体船型对重量较敏感,所以对大宗重型货物的运输,想在经济上优于单体船似乎不大可能。但是,由于它具有独特的优点,除用作客船、游览船、汽车渡船外,还可作为高速集装箱运输和短途运输的货船,以及海洋调查船、海洋工程船、海上石油开采船和供应船等。如果将小水线面双体船作为海洋油污回收船,将能全天候地在大洋上作业。



图 1.1 半小水线面双体高速车客渡船  
Fig.1.1 Passenger Ferry Semi-SWATH

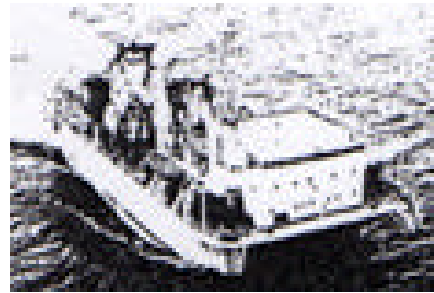


图 1.2 小水线面双体潜水作业兼海洋考察船  
Fig.1.2 Submersible & Ocean Survey SWATH



图 1.3 小水线面双体引水艇  
Fig.1.3 Pilot SWATH

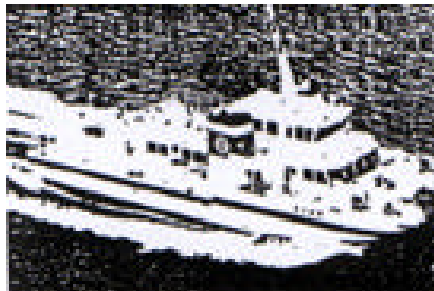


图 1.4 小水线面双体交通船  
Fig.1.4 SWATH Traffic Ferry

总之，小水线面双体船船型在许多领域有着广阔的应用前景。随着科学技术的进步，动力和材料的发展，小水线面双体船船型已经成熟，正在向高速大型化发展；有的小水线面双体船船型则经过试验研究，展现出诱人的美好前景。

## 1.2 小水线面双体船船型特点的简介

小水线面双体船是指为改善耐波性，减少兴波阻力，将双体船的片体水线处缩小形成狭长流线型截面的双体船。其主船体由连接桥结构连接左右两个片体组成。每一片体包括上船体，支柱体和下潜体。小水线面双体船集中了潜艇、水翼船、双体船特点（如图 1.5），因此性能上兼容了这些船型的优势。

小水线面双体船主要由以下几部分组成：

- （1）连接桥结构（Cross-Deck）：连接左右两片体的甲板结构。
- （2）湿甲板（Wet Deck）：连接桥结构的最下暴露表面结构。
- （3）上船体（Upper Hull）：包括主甲板及以下至支柱体以上的结构，包括舷台、甲板、抗扭箱，其上也可布置主机、辅机、特种设备及舱室等。
- （4）支柱体（Strut）：上船体以下至下潜体以上在设计水线面附近的狭长垂直结构，其截面呈扁薄，首尾端为流线型。支柱体提供了储备浮力，决定了小水线面双体船的主要特性，其割划水面的水线面较小，排水体积也较小，仅能提供不到全船 30% 的浮力。

支柱体有多种形式，单支柱、双支柱及多支柱等。其内可布置传动机构、管道系统和人行通道等。

- （5）水下潜体（Lower Hull）：支柱体下面沉浸在水下的圆形或类似椭圆形的鱼雷状结构，它提供约占全船 70% 以上的浮力（如图 1.6 所示），并且保证稳性及在波浪中航行的船舶运动。

下潜体剖面形状多样，有圆形、腰圆形、椭圆形、方形，也有水滴形及其

他变形。其内可布置推进系统（有的包括主机）、鳍的传动机构及其它特种设备，油舱、水舱、压载舱等。

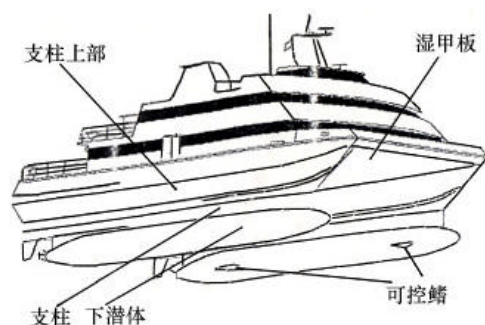


图 1.5 小水线面双体船特点示意图

Fig.1.5 Advantages of SWATH

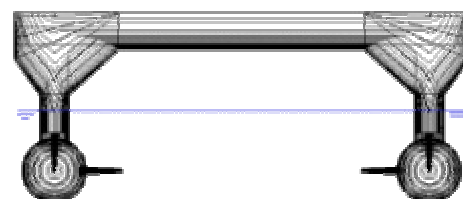


图 1.6 小水线面双体船典型横剖面

Fig.1.6 Typical Transverse Section of

SWATH

对小水线面双体船船型来说，水线面面积缩小之后船的横向稳定性就不足，因此采用“双体”结构以增加横向间距来保证其横稳性，其稳性设计的自由度比单体船大。单体船要改善稳性，需要加大船宽，从而带来航速的损失。小水线面双体船只要改变左右两个支柱的距离，就可改善稳性，对其他方面影响不大。

由于小水线面双体船的上部有一个比较大的箱形密封空间，因此当这部分空间入水时，顿时产生了一个比较大的复原力臂，待到上甲板入水后又开始迅速下降，其稳性储备是相当大的。有关资料表明，小水线面双体船的复原力臂曲线下所含面积要比单体船大好几倍。

关于小水线面双体船的完整稳性和破损稳性要求，以及储备浮力足够的衡准要求，在美国的 079-1 号设计数据册中作过规定，可以在此基础上通过分析消化予以应用或加以修正，在计算方法方面，除了具体的计算方法只涉及编程外，对一些系数的确定还需要作一定的实验验证和调查。

由于小水线面双体船船型几何形状的特殊性，与常规单体船相比，小水线面双体船船型有诸多特点，这些特点的综合效果就表现在该型船舶具有优良的水动力性能、宽敞的甲板面积和优良的操纵性。并且它的稳性问题的内容和性质与常规单体船及其他多体船型相比差异很大。目前人们都普遍关注它的耐波性能和高速航行时的阻力性能，关于该船型稳性性能研究的文献还较少。本文对于其稳性性能进行详细分析和研究，其中包括完整稳性、破损稳性以及纵向运动稳定性，以阐述小水线面双体船相对于单体船具有优良的静、动稳定性能。

诸多理论研究、模型试验、实船航行的结果表明，小水线面双体船具有如下几个显著的特点：

(1) 适航性好，耐波性能优异。美国、日本和德国的阿彼金·劳斯摩森(Abeking & Rasmussen, A&R)造船公司技术组等研究机构都对其小水线面双体船进行了全面的实船试验，试验内容包括航速—功率测量、回转、振动、稳性及耐波性能等项目，并且在耐波性试验中采用不同的浪向、航速和波频，试验结果均表明，大多数情况下小水线面双体船的耐波性能要比相等排水量的单体船好得多。

耐波性好是小水线面双体船最大的优势。由于水下潜体在水下，受波浪干



扰小；支柱割划水面面积小，因此纵摇、横摇和垂荡等都较常规船有大幅下降，有的甚至可达 50% 以上。耐波性好，带来了适应海况高、出航率高、作业质量提高、乘员晕船率低，因而比较舒适，并可为特种作业提供高稳定性的海上平台。国外实船的试航结果表明，228t 小水线面双体船的运动性能可与 3000t 常规单体船相媲美。一艘 370t 小水线面旅客船全年出航率达 94%，晕船率不到 1%。

小水线面双体船在波浪中运动的幅值和加速度均大大小于相当排水量的单体船。小水线面双体船的垂荡及纵摇、横摇运动的自然周期长，这样，有可能避开了不规则海浪中出现最频的谐波的周期，从而降低了海上的运动响应，有助于提高船员和乘客的舒适感。

(2) 航向稳定性较好。与单体船相比，小水线面双体船由于具有两个窄而长的片体，无论在低、高速时，其航向稳定性都是较好的。

(3) 操纵性好。由于有两个细长的水下潜体与较薄的支柱，其航行稳定性很好。又因为是双机、双桨、双舵而且相距较大，在低速时可实现原地转弯，操纵灵活。虽在较高航速时相对回转半径较常规船为大，但因常规单体船较长，因此绝对回转半径大致相当。由于操纵性能好，能同各类船舶实现安全靠帮，这对于海上作业来说十分重要。

(4) 稳性较好。与常规船相比，小水线面双体船主要优势在于其优良的稳性。为什么小水线面双体船有此特点呢？关键在于主船体下两个看起来像潜艇的水下潜体。由于距波涛汹涌的水下几英尺处的水流还是比较平静的，完全浸没于此水域的两个浮体就像是稳定器，提供全船的浮力，使船上的乘客感到舒适、平稳。

小水线面双体船的横向连接桥提供很大的储备浮力，保证了它具有较好的完整和破舱状态下的稳性。静稳性自由度较大，改变支柱距离可以调整静稳性，满足规范要求。水上平台是密封结构，可提供较大的稳性储备。另外通过改变浮体与主船体的纵、横向相对位置，可以改善其稳性。

(5) 不沉性好。由于可合理布置水密舱，易保持其不沉性。水上平台可提供较大的浮力，即使水下潜体进水仍有足够的浮力而不会沉没及倾覆。

(6) 总布置和结构方面的特点。小水线面双体船具有宽广的甲板面积和充裕而规整的使用空间（如图 1-7a、b、c），有利于进行总体布置。水下潜体、支柱几乎都是二维曲面，船体表面外形简单。两套主、辅机增加了可靠性。一艘设计完善的小水线面双体船主船体当它迎浪航行时，并不会受到很大的外力作用。因为它结构的几何特征使得波浪作用力能够彼此抵消。

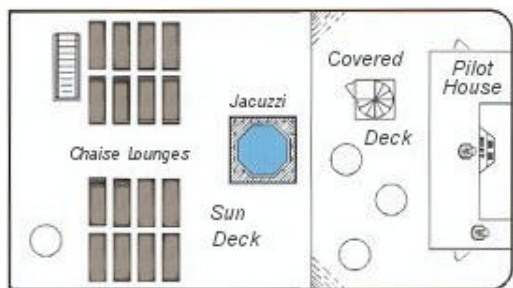
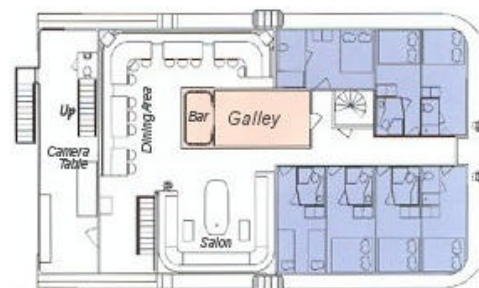


图 1-7a “PILOT”号小水线面双体船的甲板布置图

Fig1-7a PILOT's sun deck arrangement



1-7b “PILOT”号小水线面双体船的休息室布置图

Fig1-7b PILOT's lobby arrangement





1-7c “PILOT”号小水线面双体船的全体人员舱室布置图

Fig1-7c PILOT's crew cabins arrangement

### 1.3 小水线面双体船型的发展史及其在国际上的开发研究综述

“并木成筏，并舟成舫”是我国二千多年前的古籍中对“舫”的记载，它是一种将两船并列相连成为一体的“双体船”，古代还称它为“方”或“方舟”。如图 1.8 所示为古代流行于汉江支流一带的双体船—鸬鹚船。

在木板船从小到大的发展过程中，舫在相当长的时间里是和单体船并行不悖地向前发展。舫由单体船结合而成，所以它的发展总要受到单体船发展水平的制约。另一方面，因为舫离不开连结，在连结材料采用木材的条件下，舫大到一定规模时就受到连结强度的制约，而逐渐为大型的单体船所代替。

舫的“大”是由两个因素造成的：第一是连结，两船相连能够变“小”为“大”；第二是构成舫的两个单体船的增大，使舫得到进一步增大。舫的大，既有稳而宽的优点，但又使船浸在水中部分的表面积比同样排水量的单体船大的多，增加了摩擦阻力，降低了航速。船身宽大，操纵不灵活，机动性也较差。当在使用中需要船的稳性和甲板装载面积时，舫自然能够胜任，但当需要快速灵活时，舫就显得困难了。



图 1.8 鸬鹚船

Fig.1.8 Cormorant Catamaran

随着现代技术的采用，双体船的性能有了很大改善，原来舫的一些弱点被克服了，而它特有的稳性好、甲板面积大的优点，仍然被保持和发展着。

“比船于水，加板于上”，则是进一步的更为高级的连接方式，如图 1.9 所示为现藏于北京故宫博物馆的北宋《洛神赋》中的双体船，细看上去是采用二船并列而成的舫。船上安横梁，铺甲板，筑楼台，装饰得富丽堂皇。它与现代双体船的外形相似。这样，船的总宽度就比原来的单体船大大增加。船身越宽，稳性越好。

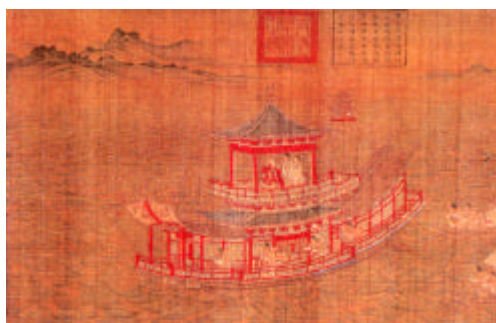


图 1.9 现藏于北京故宫博物院的北宋《洛神赋》中的双体船

Fig.1.9 Catamaran in Luo Spirit Ode

小水线面双体船又称为半潜式双体船 (Semi-Submerged Catamaran, SSC), 早在 1880 年兰德堡 (C.G.Lundburg) 以其首次提出的单体半潜船 (Semi-Submerged Monohull) 概念获专利。1938 年, 加拿大人柯立德 (Frederick G. Creed) 向英国海军部提出小水线面双体航空母舰 (SWATH Aircraft Carrier) 的设想, 并日后向美国海军进行了展示, 但没有被接受。1946 年, 柯立德获得了英国授予的专利权。50 年代末至 60 年代中期, 波瑞克 (H.Boericke) 研发的流线型鲨鱼状单体船, 拉开美国海军进行改进高速半潜船活动的帷幕。里奥波德博士 (Reuven Leopold) 等又曾向美国海军提出改进高速三体船 (Trimaran) 设计概念, 并且建造了自航试验艇, 因此获得了专利。虽然这些设计在低速和中速时的性能较好, 但未能解决小水线面双体船纵向运动稳定性这个对航行安全至关重要的问题。

1968 年, 麻省理工学院学生研发流线型的双体半潜艇设计方案, 并开展了模型试验, 被称为半潜双体船 (the Semi-Submerged Catamaran, SSC)。1969 年, 美国海军水下中心 (Navy Underwater Center, NUC) 的朗博士 (Tom Lang) 对一种高速半潜双体船概念在阻力、稳性及动力响应方面开始集中研究开发, 提出了一个新的小水线面双体船设计方案, 并于 1971 年获得美国专利。该方案的关键突破是在船的重心以后的双体内侧, 增加了两对可调水平鳍, 来保证船体在高航速时的纵向运动稳定性。



图 1.10 兰德堡的单体半潜船概念

Fig.1.10 Semi-Submerged Monohull



图 1.11 柯立德的小水线面双体航空母舰的设想

Fig.1.11 SWATH Aircraft Carrier



图 1.12 里奥波德博士提出的高速三体船概念

Fig.1.12 Trimaran



图 1.13 具有可调水平鳍的高速半潜双体船

Fig.1.13 the Semi- Submerged Catamaran with adjustable horizontal fins

荷兰造船工程师斯坦格尔 (J.J.Stenger) 以自航油井探测供应船为母型, 并参照潜艇在潜望镜深度时波浪干扰影响较小的经验, 完成了小水线面双体钻探船“杜普鲁斯”号 (DUPLUS) 的新设计。1971 年, 该船在荷兰建造成功, 用于大陆架海区钻探和潜水工作, 是世界上第一艘低速小水线面双体船下水。该船船长 40m, 航速为 8kn, 排水量 1200 吨, 两个下潜体之间设有连接翼板, 在翼上设有 4 个直翼推进器以供定位操控。

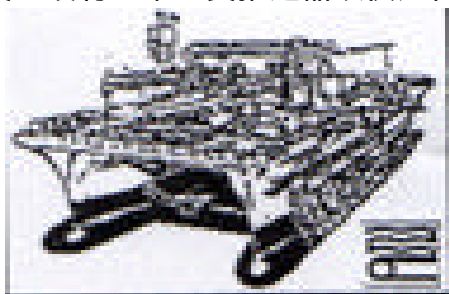


图 1.14 “杜普鲁斯”号小水线面双体钻探船

Fig.1.14 DUPLUS Drilling SWATH

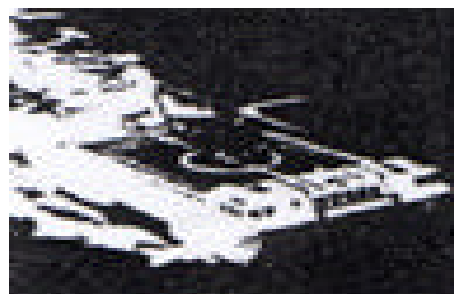


图 1.15 “卡玛利诺”号小水线面双体靶场保障船

Fig.1.15 KAIMALINO Range Supply SWATH

1972 年, 经过美海军水下中心的工程师们 18 个月的研究和约 30 个月的设计和船模验证试验后, 终于开工建造 190 吨级“卡玛利诺”号 (KAIMALINO) 小水线面双体靶场保障船, 并于 1973 年 3 月顺利下水, 10 月开始试航。随后的全面科研考核性试验既证实了优秀的耐波性, 又积累了大量实测数据, 为今后小水线面双体船发展打下技术基础。卡玛利诺是世界上首艘实用小水线面海洋工作船, 至今仍在出色的营运。

1973 年, 美海军权威技术人士肯定了将 SWATH 作为小水线面双体船的缩略语, 并认为这一称谓比 SSC 更利于推广应用, 也从概念上有别于常规双体船。从此, 小水线面双体船正式走入世界船型录的大舞台。

日本三井工程与造船公司继 1976 年建成 18 吨、载客 20 位的试验艇“海上能手”号 (MARINE ACE) 后, 1979 年建成世界上第一艘商用 MESA80 型陆岛间小水线面双体客渡船“海鸥”号 (SEAGULL)。该船载客 446 位, 航速 26.5 节, 采用左右单支柱, 共有 4 个水平稳定鳍, 营运海况达到有义波高 3.5 米, 4 级海况时失速仅 2%。10 年后即 1989 年交付的“海鸥-2”号航速提高到 30 节以上, 仍作陆岛间客渡用。

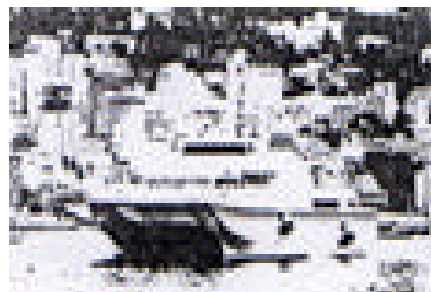
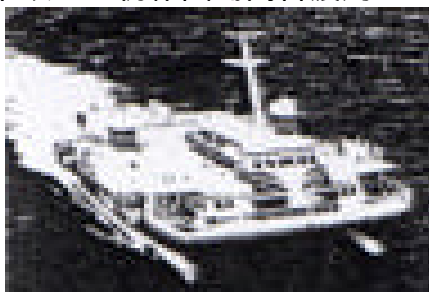


图 1.16 日本三井工程与造船公司建造的“海上能手”号试验艇

及“海鸥”号小水线面双体客渡船

Fig.1.16 MARINE ACE SWATH Test Vessel and SEAGULL SWATH Ferry

70 年代末, 日本考虑新建一艘高性能海上测量船, 要求其具有高耐波性、

高适居性、高操纵性、宽敞的甲板面积及舱容等。三井工程与造船公司推荐采用小水线面双体船型，并以钢-铝混合结构方案中选，1980 年 12 月建成“轻骑”号（KOTOZAKI）小水线面双体水文观测船。1981 年三菱造船公司也建造了 1 艘基本同型的“大鸟”号（OHTORI）水文观测船，服务于日本沿海。1985 年，三井工程与造船公司又建成 3500 吨级“海洋”号（KAIYO）潜水作业兼海洋考察船，该船成为世界上第一艘大型小水线面船。

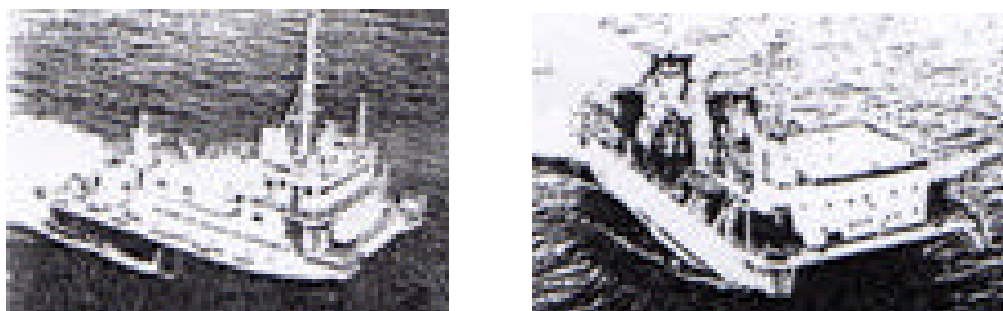


图 1.17 日本三井工程与造船公司先后建造的“轻骑”号小水线面双体水文观测船  
及“海洋”号潜水作业兼海洋考察船

Fig.1.17 KOTOZAKI SWATH Hydrological Observation Vessel  
& KAIYO Submersible and Marine Research Ship

1977 年起美国塞德博士（Dr.Ludwig Seidi）开始致力于开发 SWATH 船的商用方案，并与太平洋海事服务公司合作。1987 年筹资开工建设“纳瓦台克 I”号（NAVATEK-I）观光游览船，1989 年 2 月下水，1989 年 4 月起试航。1990 年该船获美国海岸警卫队颁发的可跨洋运载 400 名旅客的证书，成为美国 and 世界上首艘获准商业性海洋客运的小水线面双体船。

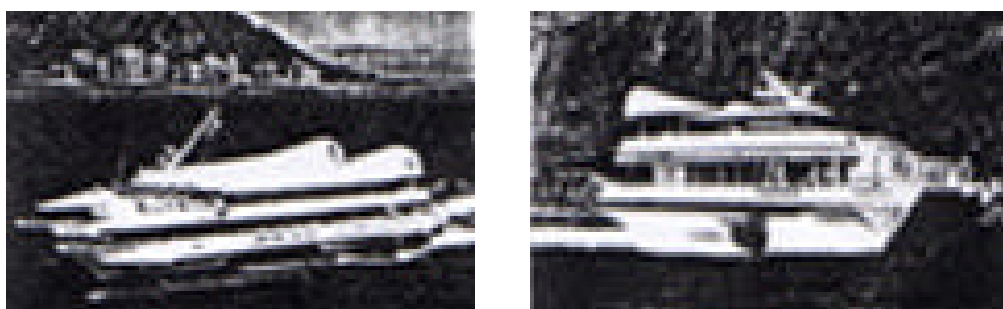


图 1.18 “纳瓦台克 I”号观光游览船

Fig.1.18 NAVATEK-I Sightseeing and Tourist Ship

从 1986 年起，“胜利”级（VICTORY）小水线面双体水声监听警戒船由美海军组织开发、设计，1991 年建成。该船长 71.5 米，排水量约 3396 吨，交付给美军事海上运输司令部。在 1991-92 年冬季北大西洋和北太平洋试航中证明，在有义波高 5.4 米时可 100% 正常作业，而同级单体船只能 10%。6 级海况时最大横摇角(单幅)小于  $5.8^\circ$ ，且最大纵摇角(单幅)小于  $3^\circ$ 。



图 1.19 “胜利”级小水线面双体水声监听警戒船

Fig.1.19 VICTORY SWATH Hydroacoustics Monitor Guard Ship

1992 年, 芬兰造船厂向钻石旅游公司交付世界上第一艘“雷迪逊钻石”号 (RADSON DIAMOND) 小水线面双体豪华旅游客船, 该船船长 131 米, 总吨位达到 18000 吨, 在当时是世界上最大的小水线面船。

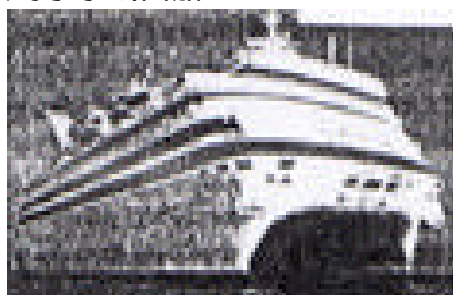
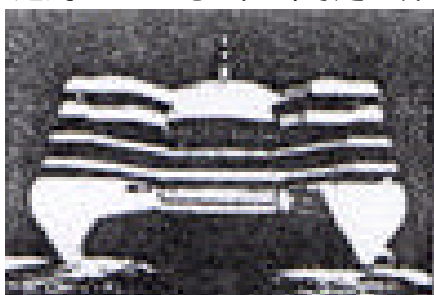


图 1.20 “雷迪逊钻石”号小水线面双体豪华旅游客船

Fig.1.20 RADSON DIAMOND SWATH Luxurious Passenger Ship

1993 年, 世界上第 1 艘所谓隐身船“海幽灵”号 (MARINE GHOST) 向公众透露, 她是美国海军一艘 A 形框架、50 米长的小水线面双体船, 由洛克希德导弹与宇航公司在 80 年代中期开发建成。



图 1.21 “海幽灵”小水线面双体隐身船

Fig.1.21 MARINE GHOST SWATH Ship

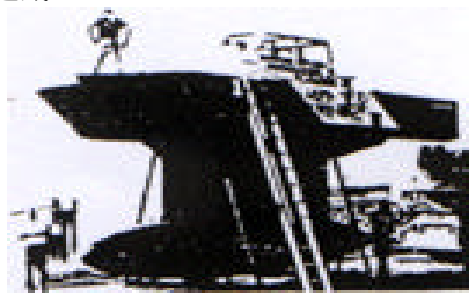


图 1.22 “搜寻”号小水线面试验艇

Fig.1.22 QUEST SWATH Test Vessel

1994 年, 美国海军委托海事应用物理公司开始研制单支柱单下体带可控水翼的小水线面试验艇“搜寻”号 (QUEST), 1995 年进入海上试验, 1996-1997 年在大西洋做扩大鉴定试验, 该艇为铝质, 实测浮航排水量 12.2 吨, 最大航速 35 节, 在 4 级海况下有很好的适航性, 5 级海况 (浪高 2.44 米) 时, 仍能保持 30 节以上航速。由于美国海军旨在探索小水线面船高速化的新途径, 为此, 该公司已于 1999 年末推出 800 吨级 45 节和 300 吨级 36 节两种军、民用艇的设计方案。

1995 年, 日本三井公司开工建造“宇宙”号 (COSMOS) 小水线面双体



油田交通船，载客 100 位，排水量近 155 吨，航速 20 节，当年 10 月交船。由日本汽船公司组织营运，开创出在太平洋为近海石油产业服务的小水线面倒班交通专用船的先例。美国随后也为大西洋美国与巴西之间的近海石油产业开发了“静水河”号（STILLWATER RIVER）小水线面双体油田交通船，载客 250 位，排水量约 200 吨，用燃气轮机为主机，航速达 29 节，已于 1999 年交付美国路易斯安那州坎可海事服务公司组织营运。

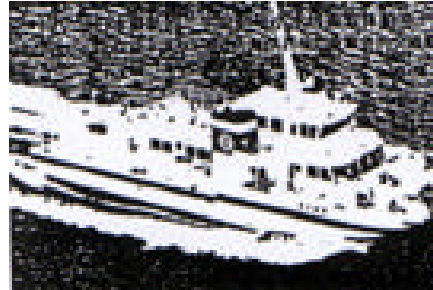
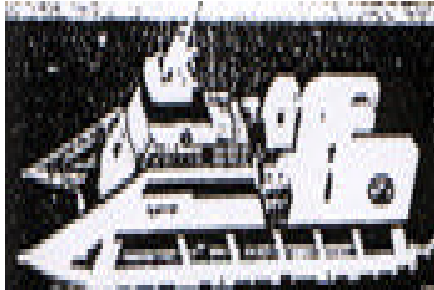


图 1.23 “宇宙”号和“静水河”号小水线面双体油田交通船

Fig.1.23 COSMOS and STILLWATER RIVER SWATH Oil Field Traffic Ship

1997 年，丹麦与澳大利亚合作开发了 Mai Mols 号半小水线面高速车客渡船，适应于中低海况下使用，把中型小水线面船航速提高到 40 节以上。

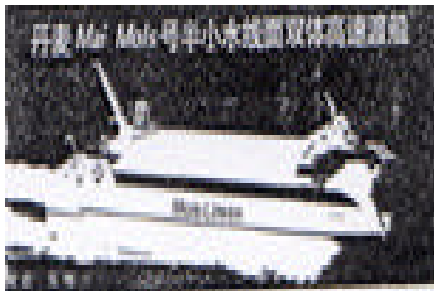


图 1.24 Mai Mols 号半小水线面双体  
高速车客渡船

Fig.1.24 Mai Mols SWATH Passenger Ferry



图 1.25 “斯莱司”号小水线面四体  
多功能试验艇

Fig.1.25 SLICE SWATH Test Vessel

1998 年，美国洛克希德 马丁公司在美海军投资领导下，开发出“斯莱司”号（SLICE）小水线面四体多功能试验艇，确保艇速在 5 级海况下，任意航向仍达到 30 节，比设计最高航速 31 节，最多降低 1 节，开创了高速高适航小水线面船概念的新思路。

德国 A&R 造船公司自 1993 年开始研究开发小水线面双体船，并把应用目标投向港监引水，1996 年被德国交通港务部门认可，开始设计建造被称为“2000 年引水系统”，包括 50 米长的引水母船和 25 米长的引水交通艇，均采用小水线面双体船型，并要求确保在北海 3.5 米有义波高条件下正常作业，现“多塞”号、“易北”号两型都已成功地在营运中。

长期的考验使人们认识到小水线面双体船的优越性，引起了全世界造船界的关注。美国、日本、芬兰、挪威、丹麦、英国、韩国、俄罗斯等已先后建成实船近 50 多艘，小至 6.5t 的交通艇，大至 11000t 的海上娱乐船。

美国的小水线面双体船发展大致经历了三个阶段：第一阶段创立了小水线面双体船新概念，在线型、流体、结构、耐波性、操纵性等基础理论与研究试验方面取得了一系列成果，并拥有相当的技术储备；第二阶段，大体在 1990

年至 1995 年, 坚持军民结合, 向实用化、大型化、高速化、多功能和隐身化方面发展, 其技术日益成熟; 第三阶段是 1996 年以后, 建成并正在建造一批技术更加先进的实用型小水线面船, 且已出现第二代新型号。1997 年, 美国建造了“司莱斯”号小水线面四体四支柱船, 在五级海情下可保持 30 节的高速, 代表了新一代小水线面船型。从中可以看出, 美国海军始终重视安排主导研制方向, 有步骤地投入研究试验和建造试用, 先后开发出多型军用实船, 使小水线面双体船技术日臻完善。

日本、韩国与欧洲各国在开发小水线面双体船上起步时间不同, 水平也有差别, 但比较注意技术交流与引进, 又从本国需求出发, 着力于应用研究和实用设计。英国和德国有些基础技术和设计计算软件从美国引进, 也有自身创新开发的新技术。1998 年, 德国海军开始了代号为 751 的新一代水下武器电子系统试验船的研制, 2002 年交船, 并提出了 400 吨级、1200 吨级、2000 吨级小水线面护卫舰艇和 20000 吨级轻型航空母舰的设想。

德国 A&R 造船公司是德国一个近百年的著名船厂, 一直注重开发特种船艇与高性能船, 自 1993 年起与美国海洋工程咨询公司(OEC)合作, 收集了世界上 41 型小水线面双体船的情报, 并且进行分析, 利用其从 70 年代起开发美国 KAIMALINO、NAVATEK-、NAVATEK-、VICTORY 等各种规格小水线面双体船的实践已证明成熟有效的设计计算软件, 自行研究设计建造适合德国使用的小水线面双体船。德国小水线面双体船吸取了美国技术, 又有本国设计建造经验, 首先在复杂海情下引水业务上开拓了应用市场, 取得了突出效果。目前德国正向东南亚有关国家推荐在港监引水、海岸井备、海上作业、海洋考察、潜水救生、交通旅游方面推广应用。

近年来, 国外许多有关的研究机构对小水线面双体船在军事上的应用前景做了专门的分析论证, 北约组织对高性能船长期规划探讨结果认为, 小水线面双体船最适用于 3000-6000 吨左右的反潜护卫舰、6000-12000 吨左右的护航航空母舰和 12000-24000 吨左右的小型航空母舰。此外, 还可用于其它 1500-3000 吨左右的海洋作战舰船。如表 1.1 所示, 是 1974 年至 1999 年世界上已建造的小水线面双体船主要数据。

可以说, 小水线面双体船的性能好, 在高海情下适用范围广, 相当排水量下比常规单体船功能强, 正处于开始推广应用时期。我国有关小水线面双体船的研究工作始于 70 年代后期, 着重于快速性、耐波性等水动力性能模型试验、性能分析计算程序编制和方案论证等方面的研究。经过三个五年计划的技术攻关, 已全面掌握了小水线面船技术, 取得了具有世界先进水平的科研成果, 建立了“小水线面船工程技术系统”形成了一套完整的技术系统, 包括主尺度与船型优化、航行性能预报、结构外载荷、结构强度与疲劳分析及总体设计方法及相应实验技术、设计计算软件等。他们应用自己的研究成果, 中国船舶科学研究中心曾对多种类型的小水线面双体船进行了设计开发, 包括 700t 巡逻船、400 客位沿海客船、小型水文测量船、400t 反潜巡逻艇以及 800t 渤海油田交通船等, 其中有些项目已深入到初步设计的阶段。他们的工作为我国小水线面双体船的发展奠定了坚实的基础。图 1.26 所示, 是我国首艘小水线面双体船——海关监管艇“海关 201”号。它用于珠江口三门岛和桂山岛海域与泊区附近, 在 5 级海况下能进行海关监管正常作业, 并可用作基地与监管海域间的海上交通及缉私。“海关 201”号标志着我国小水线面双体船应用开发进入实质性发展的新阶段。

表 1.1 70 年代至 1999 年世界上已建造的小水线面双体船主要数据表

Tab.1.1 Data sheet of SWATH existed since 70's around the world

船名	卡玛林洛 【 KAIMALINO 】	海上能手 【 MARINE ACE 】	海鸥【 SEAGULL 】	轻骑 【 KOTOZAKI 】	大鸟【 OHTORI 】	休弗林诺 【 SUAVELINO 】	海洋 【 KAIYO 】	平稳 【 HALCYON 】
所属国	美	日	日	日	日	美	日	美
用途	试验及辅助船	中间试验性艇	客运渡船	海洋调查船	海洋调查船	试验船渔船	海上作业实验船	海岸巡逻艇
完工日期	1974 年	1977 年 10 月	1979 年 9 月	1980 年 12 月	1980 年 12 月	1981 年	1984 年 10 月	1985 年 3 月
全长【 m 】	26.8	12.35	35.9	27.0	27.0	19.2	60.0	18.3
两柱间长【 m 】	23.5	11.00	31.5	25.0	25.0	16.8	53.0	—
型宽【 m 】	13.7	6.50	17.1	12.5	12.5	9.1	28.0	9.14
型深【 m 】	—	2.70	5.85	4.6	5.1	—	10.6	—
设计吃水【 m 】	4.65	1.55	3.15	3.2	3.4	2..13	6.3	2.13
排水量【 t 】	190/217	18.4/22.2	343	236	239	53	2849	57
载重量【 t 】 （或乘员）	—	20 人	446 人	约 36t	120 人	约 14t	约 860t	—
支柱形式	双支柱	双/单支柱	单支柱	单支柱	单支柱	单支柱	单支柱	单支柱
结构材料	钢—铝	全铝	全铝	钢—铝	钢—铝	全铝	全钢	全铝
推进系统	燃气轮机 + 链传动 1545KW×2	汽油机 + 直角齿轮 147KW×2	柴油机 + 直角齿轮 2978KW×2	柴油机 + 直角齿轮 1397KW×2	柴油机 + 直角齿轮 1397KW×2	柴油机 + 直角齿轮 313KW×2	柴油机 + 电传动 1250KW×4 860KW×4	柴油机 + 皮带传动 375KW×2



船名	SEAGULL-2	NAVATEK-1	PATRIA	CHUBASCO	NAVATEK-2	COSMOS	CLOUD－X	SLICE	STILL WATER RIVER	SUKHOI
所属国	日本	美国	英国	美国	美国	日本	美国	美国	美国	俄罗斯
用途	客渡	观光	客渡	渔业指导	观光	油田交通	娱乐	公务	油田交通	客运
完工日期	1989	1989	1990	1993	1994	1995	1996	1997	1999	1999
全长【m】	39.3	43.0	36.5	27.5	25.0	28.9	37.2	31.7	36.6	32.3
船宽【m】	15.6	16.0	13.0	13.7	11.6	11.3	18.0	16.8	13.1	10.5
吃水【m】	3.25	4.3	2.7	2.7	1.7	2.4	3.4	4.3		2.3
排水量【t】	350	371	180	183	230	155	236	177	~200	154
航速【节】	30.6	18	31.7	25.0	23.0	20.0	28.3	31.5	29.0	28.0
动力	4－MTU	2－MWM	2－MTU	2－CAT	2－MTU	2－新泻	2－燃	2－MTU	2－燃	2－MTU
结构材料	铝	铝	铝	铝	铝	铝	铝	铝	铝	铝
功率【千瓦】	7882	2014	4080	4200	1206	2240	5740	5110	9200	3000
负载【人】	410	430	400	140	150	100	450	50 吨	250	186
建造船厂	三井玉野	PMSC	FBM	SPS	PMSC	三井	NBBBI	LMGES	ESBG	ALMAZ



图 1.26 我国首艘双体小水线面海关监管艇"海关 201"号

Fig.1.26 The First SWATH*Custom 21* in China

最近，上海交通大学海洋工程国家重点实验室在前人研究小水线面双体船和水翼艇的基础上，开发了新型小水线面双体船复合船型—双体小水线面水翼复合型高速船（HYSWATH），图 1.27、1.28 分别是该船船模及在 ITTC 试验池 HYSWATH-400 的静浮状态，表 1.2 为该船的总体参数。

表 1.2 双体小水线面水翼复合型高速船方案的总体参数

Tab.1.2 Design Data Sheet of HYSWATH

船名	HYSWATH-400				
总长	$L_A$	37.2m	垂线间长	$L_{pp}$	34.6m
型宽	B	16.7m	型深	D	8.8m
静浮吃水	$T_1$	5.3m	翼航吃水	$T_2$	3.3m
静浮排水量	1	400t	翼航排水量	2	240t
静浮浮心纵向位置	$X_{b1}$	-0.024m	翼航浮心纵向位置	$X_{b2}$	0.478m
重心高度	$Z_g$	5.35m	重心纵向位置	$X_g$	-0.024m
翼航速度	U	40kn			



图 1.27 HYSWATH-400 模型

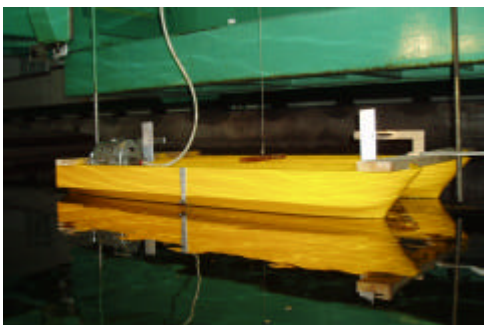


图 1.28 HYSWATH-400 模型静浮状态

Fig. 1.27 The Model of HYSWATH-400      Fig. 1.28 The Model of HYSWATH-400 at Rest

总之，由于小水线面双体船具有优良的耐波性、快速性、稳定性及操纵性等显著的航行特点，被广泛应用在气候环境恶劣，风、浪、流作用频繁的海况下。而优良的静水力性能、稳性特点以及平衡方面的各种优势，也使她成为现代造船业不懈研究与开发的新船型，在尝试了与一些高速船型的先进技术相结合的复合船型以后，小水线面双体船也越来越凸显出其优秀的综合性能，必将对未来船舶发展产生深远影响。

1.4 本文的意义和主要工作内容

与空运、陆运相比，水运不仅载量大，且所需投资也相对的省，无疑应得到充分优先的发展，随着经济建设的需要，当今世界各国极为关注和重视高性能船舶的研发，各种新船型层出不穷。目前我国在高速船铝材及主要配套方面我国已有初步基础，而且不少船厂在建造工艺方面取得了初步经验，形成了施工的力量，至于科研与设计更有一定的水平，曾取得了不少试验或研究成果等等都是我国发展高速船的物质基础和客观条件，将引导中国造船行业核心竞争力的提升和未来的可持续发展，加大高性能船舶的研究与开发力度刻不容缓。

本文以一艘小水线面双体船为例，主要完成了方案设计、稳性性能研究、纵向运动稳定性分析和结构初步设计三部分内容，得出了一些有意义的结论，以期对国内该船型的后续深入研究能有一点参考价值。

本文具体工作内容简介如下：

(1) 首先提出了小水线面双体船船型方案，依次开展了主体尺度要素确定、主体和下潜体型线设计及光顺、下潜体尺度和布局要素确定、总布置设计、重量重心估算等工作，为后续性能和结构研究提供一个明确的研究对象。

(2) 本文在研究小水线面双体船的稳性性能时，采用 HYDROMAX 软件分别分析在完整状态（未破舱）及一个或数个舱室破损进水后的稳性，最后根据中国船级社（CCS）、国际海事组织（IMO）、美国海军的相关稳性要求进行全船完整稳性的校核。

(3) 当航速达到一定值之后，就必须研究小水线面双体船在纵向平面内的运动（简称为纵向运动）的稳定性问题。基于此，论文在小水线面双体船的运动稳定性方面，根据前人研究的结果，主要讨论了静水中小水线面双体船的纵向运动稳定性以及迎浪航行时小水线面双体船的纵向运动稳定性。

(4) 进行该小水线面双体船的典型横剖面结构型式设计，并按照 CCS 规范初定出各构件型式和材料。

## 第 2 章 小水线面双体船的方案设计

### 2.1 引言

近年来, 欧洲和美国的高速公路运输能力日趋饱和, 据预测到 2010 年欧洲公路货运量将增长 50%, 这将给陆上交通运输带来很大压力。为此, 欧盟近年提出建设“海上高速公路网络”的构想。人们的目光也由此开始转向水路运输, 开发海上高性能船舶以解决海上运输力一时之间成为热谈。

据《解放军报》消息, 近年来, 越来越多的双体船占据了民用和军用船舶市场。它们新颖的外观、独特的综合性能受到世界各国的瞩目。据外电报道, 美国海军新近欲按计划接收一艘高速双体船: “海上斗士”号, 此消息再一次引起了人们对双体船的关注。为进一步改善高速双体船的综合性能, 人们在高速双体船的基础上派生了若干新型的双体船型, 主要著名的有小水线面双体船和穿浪双体船等。

为了开发与利用海洋, 必须到海洋上去活动, 但海洋上波浪滔天, 往往使一般的船艇在海上活动受到很大限制。传统的单体船、双体船等在风浪中纵横摇摆、升沉垂荡是很严重的, 这样不仅影响船艇自身安全, 而且使长期在船艇上工作的船员、水兵们都要挺过克服晕船这一关; 但那些考察海洋的科学家, 去海上油井倒班值勤的工人, 坐海船旅游的乘客们, 又往往难以承受晕船之苦。怎样在船艇适航性上取得“全海候”的水平, 和“不晕船”的状态呢? 这个难题摆在造船科学家面前已有上百年。从 19 世纪, 欧洲人就开始研究, 直到 20 世纪 70 年代, 才在理论和实践结合基础上有了解决措施。这就是利用和发展了《应用流体力学》, 把小水线面 (Small Water-Plane-Area) 概念延伸与半潜双体船 (Semi-submerged Catamaran) 结合而创造出的高技术成果。现在已被简称为小水线面双体 (Small Water-Plane-Area Twin Hull) 船, 英语缩略为 SWATH, 并通用于全世界, 形成了当代高性能船中很重要的一朵奇葩。

从 70 年代初至 2000 年 5 月, 世界上有 10 个国家已经开发和拥有小水线面双体船共约 52 艘。其中美国 (26 艘) 和日本 (14 艘) 是小水线面双体船开发最早、拥有量最多、技术水平最高的两个国家; 德国、英国各有 3 艘; 荷兰、挪威、芬兰、韩国、丹麦和俄国 6 个国家各有 1 艘。德国在开发和应用方面都有后来居上的势头, 他们着重发挥小水线面双体船在大风浪条件下高出勤、“全海候”、不晕船的特点, 适于承担紧急海事救难, 持续巡逻执勤, 海关缉私、港监引水、渔政海监、潜水打捞、油井守护交通等海上特种作业, 开展海洋考察、水文测量等调查研究工作, 开创海峡、岛陆间的轮渡航运、观光旅游、海上娱乐等产业。军事上也成功地用做水声侦察警戒、武器试验保障、隐身技术试验等船艇, 正在探索和开发在水面作战舰艇上的应用。

中国的海岸线极长, 拥有琼州海峡、台湾海峡、渤海湾内海以及众多的海湾和岛屿, 为水上客运的发展提供了良好的地理条件。随着中国加入 WTO, 进出口贸易往来频繁, 经济持续快速地发展, 高速海上客运市场需求随之愈发强劲。但是就目前国内高速水运市场的占有率和发展趋势却远不尽如人意。我国正在营运的交通渡船船龄普遍偏高, 并且这些正在营运的交通渡船大多为国外已经淘汰的二手船, 船型老旧, 设备老化, 舒适性差, 已经无法满足我国水上高速客运发展的需求。因此, 加大水上客运的新船型自主研发上的投入力度已

是迫在眉睫。

高速船型能否在海上客运市场上拥有一席之地, 具有恒久的竞争力, 必须保证以下几个条件的满足:

- (1) 海上机动能力, 包括高航速、适航性、抗风耐波性;
- (2) 安全性能, 包括提高可靠性、可维修性、加强抗沉和其他防险能力;
- (3) 经济性。

本文提出一种小水线面双体船的设计方案, 该船型具有良好的稳性和优异的耐波性, 与常规单体船相比, 在相当排水量条件下, 其水线面面积较小, 受波浪干扰力较小, 在波浪中具有优越的耐波性。另外, 还具有宽阔的甲板面和充裕的使用空间, 可以大幅提高客/货装卸效率。总之, 小水线面双体船具备应用于海上客运的诸多优势和潜力, 值得我们去深入探讨和研究。

## 2.2 小水线面双体船的基本要求

- (1) 用途: 主要用于中国海岸线周围, 沿海航区的乘客的快速运输。
- (2) 船型: 小水线面双体船船型, 单支柱型, 水下潜体为潜艇线型。
- (3) 本船推进方式采用常规螺旋桨, 每个主体的潜体尾端设置螺旋桨推进器。
- (4) 要求服务航速 20kn, 最大航速 28kn, 续航力为 600n mile。
- (5) 本船设计载客 300 人, 船员 10 人。
- (6) 稳性满足 IMO《国际高速船安全规则》、CCS《钢质海船入级与建造规范》、CCS《船舶与海上设施法定检验规则》及美国海军的要求。
- (7) 为了能够兼收控制船体结构重量和造价的双重效益, 本船采用钢-铝混合结构方案, 即乘客甲板以下结构(包括主船体、潜体)采用高强度钢, 连接桥、乘客沙龙和驾驶室结构采用铝合金。

## 2.3 小水线面双体船的设计思想

小水线面双体船的运动原理是: 海面上的波浪对船体产生作用力, 由于两潜体的影响, 当船体的吃水增大时, 此作用力迅速降低。如果设计水线处的水线面面积减小, 波浪激振力也会随之降低。对于支柱尺寸的适当选取, 可以在一定范围的波浪频率内, 使支柱和船体上的垂直波浪净作用力达到零。

但是, 小水线面双体船的优化设计并不是忽视速度/功率的比率大小, 降低承载能力来降低船舶运动响应。相反, 出于对船上人员、设备正常工作和晕船的考虑, 应在标准允许范围内, 选取适当的支柱水线面积/浮体面积(比值), 以减小船舶运动响应和加速度。鉴于此, 与移动石油钻探平台相比, 小水线面双体船的水线面积通常适度减小。虽然没有普遍的认同标准, 所有小水线面双体船的水线面积不及相当排水量的单体船的一半。

在初步设计阶段, 如果支柱水线面积大小降低, 主体横向间距就必须增加, 以得到足够的横向稳性, 这样才能够抵挡由于风或所有乘客集中一舷的运动所带来的横倾力矩。在既定船长下, 由于增加主体横向间距将导致船体重量增加, 那么选择很小的水线面积通常会使船舶体积增大, 建造成本提高。

支柱体积的减小, 使得推进装置空间减小, 从结构角度考虑也不太合适。瘦削型支柱有利于降低波浪阻力, 但是同时也会增加船体的湿面积, 使磨擦阻力增大。

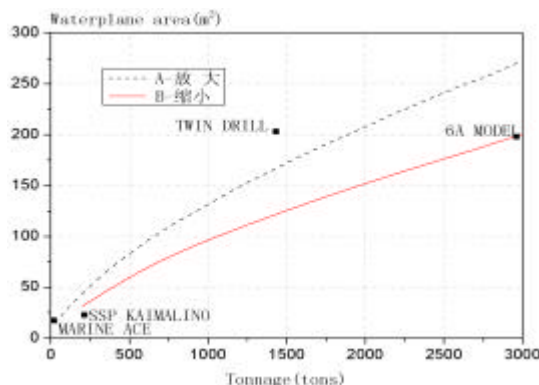


图 2.1 水线面积对排水量的变化趋势

Fig.2.1 Trend of Waterplane Area vs. SWATH Ships Size

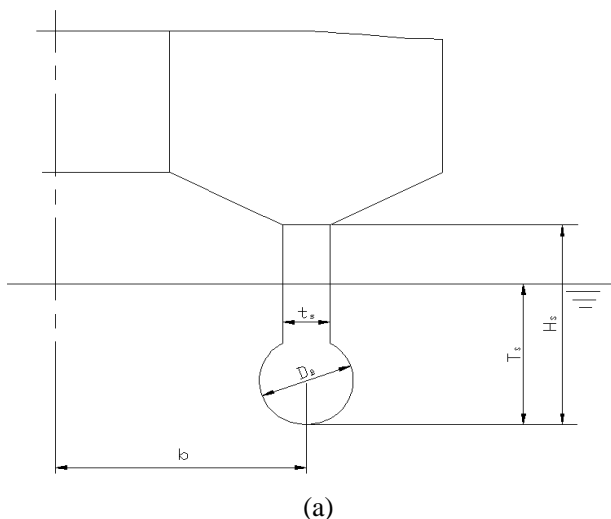
适当减小主体下侧连结结构的尺寸, 可以使小水线面双体船在波浪上安全航行。这种运营模式将产生最小的垂向运动, 叫作“凌波平航”。设计小水线面双体船时, 必须考虑使其具有尽可能短的横摇周期, 以保证其在低速下具有固定的摇摆曲线, 这在很大程度上取决于设计者选取的水线面面积。

减小船的水线面积, 将大部分排水体积移至远离水线面的深处, 从而减小波浪扰动力(矩), 达到减小船在波浪中运动的效果, 实现优良的耐波性, 是小水线面双体船概念产生的基础。可以说, 小水线面双体船在产生的同时就已经实现了它优良的耐波性, 因此, 对设计师们来讲, 如何选取合适的船体主要尺度和几何形状就是小水线面双体船设计的最主要的问题了。

## 2.4 小水线面双体船的主体尺度要素方案确定

在确定小水线面双体船的主体尺度之前, 首先需要考虑的因素有:

- (1) 根据连接桥的尺寸初定船舶的垂线间长  $L_{pp}$  和最大船宽  $B_{max}$ ;
- (2) 吃水的选择需要考虑具体航区和港口实际水深, 型深应满足规范对于干舷和最小船首高度的要求, 同时要保证连接桥湿甲板距离水面有合适的高度, 以减小波浪拍击 (Slamming);
- (3) 设计工作除了需要考虑阻力性能, 还需要考虑稳定性等其它性能来生成片体水下部分线型。



(a)

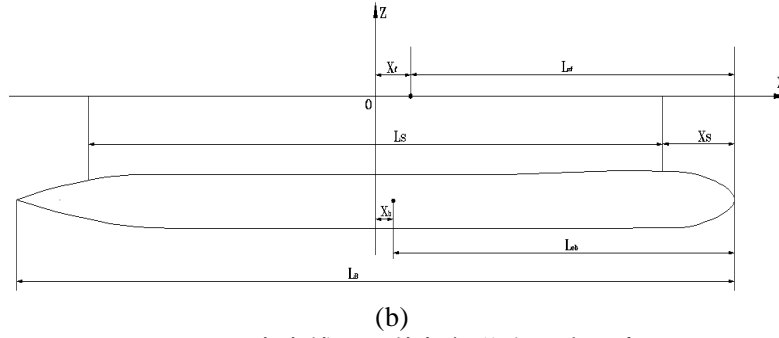


图 2.2 小水线面双体船部分主尺度示意图

Fig.2.2 A sketch map of geometric parameters of SWATH

图 2.2 给出小水线面双体船部分主尺度的定义，其中  $D_B$  为主体横中剖面直径， $t_s$  为支柱最大厚度， $H_s$  为支柱高度， $T_s$  为主体吃水， $2b$  为两潜体中心距；

通过分析计算，本文根据参考文献[51]，初定船舶垂线间长  $L=34.6\text{m}$ ，最大船宽  $B_{\max}=16.7\text{m}$ ，设计吃水  $T=3.24\text{m}$ 。

分析国内外发表的小水线面双体船方案设计资料以及完工的主尺度要素方案，取潜体的长度-直径比  $L_B/D_B$  分布在  $10\sim 20$  之间，支柱长度-厚度比  $L_S/t_s$  一般不小于 18，棱形系数  $C_p$  范围大致介于  $0.5\sim 0.85$  之间，因此，生成小水线面双体船主体线型主要生成小水线面双体船支柱的水线方程和主体横剖面面积曲线。

典型的小水线面双体船支柱的最大半宽和主体的最大横剖面分别位于支柱中横剖面 and 主体中横剖面，即有：

$$\begin{cases} t_m(0) = t_{0m} \\ A_m(0) = A_{0m} \end{cases}$$

式中：

$t_{0m}$ —支柱最大厚度的一半，m；

$A_{0m}$ —主体最大横剖面面积， $\text{m}^2$ 。

同时考虑主体和支柱都具有平行中体，有：

$$\begin{cases} t_m(0) = t_{0m} \\ t_m(x_q) + t_m(-x_q) = 2t_{0m} \\ A_m(0) = t_{0m} \\ A_m(x_p) + A_m(-x_p) = 2A_{0m} \\ t'_m(0) = 0 \\ t_m(x_q) - t_m(-x_q) = 0 \\ A'_m(0) = 0 \\ A_m(x_p) - A_m(-x_p) = 0 \end{cases}$$

式中  $x_q$  和  $x_p$  分别表示支柱和主体的平行中体中的任一点，中横剖面前后的平行长度可根据设计要求来确定。

设主体下潜体的长度为  $L_B$ ，支柱的长度为  $L_S$ ，取无因次长度坐标  $x$ ，有：

$$x = (\bar{x}_B, \bar{x}_S), \quad -1 \leq x \leq 1;$$

$$\bar{x}_B = 2x_B / L_{Bm}, \quad \bar{x}_S = 2x_S / L_{Sm}。$$

并作如下变换：

$$x = \sin q, \quad -p/2 \leq q \leq p/2$$

应用第一类和第二类切比雪夫多项式：

$$\begin{cases} U_m(x) = \cos[(2m-1) \sin^{-1} x] \\ V_m(x) = \sin(2m \sin^{-1} x) \end{cases}$$

可将支柱的水线和支柱的横剖面面积曲线表达成下述形式：

$$t_m(x) = t_{0m} \sum_{m=1}^{n_s} [A_{Sm} U_m(x) + B_{Sm} V_m(x)] \quad (2-1)$$

$$A_m(x) = A_{0m} \sum_{m=1}^{n_B} [A_{Bm} U_m(x) + B_{Bm} V_m(x)] \quad (2-2)$$

2)

式中：

$A_{Sm}, B_{Sm}, A_{Bm}, B_{Bm}$ —拟合系数；

$n_s, n_B$ —切比雪夫多项式的项数。

同时，分别用  $A_{wm}, M_{wm}, I_{wm}$  表示一个片体支柱的水线面积和其一次、二次矩，则由式 (2-1) 和 (2-2) 可知：

$$A_{wm} = 2 \int_{-1}^1 t_m(x) dx \quad (2-3)$$

$$M_{wm} = 2 \int_{-1}^1 x \cdot t_m(x) dx \quad (2-4)$$

$$I_{wm} = 2 \int_{-1}^1 x^2 \cdot t_m(x) dx \quad (2-5)$$

同理可将一个片体下部潜体的排水体积和其一次矩表示为：

$$\nabla_{Bm} = \int_{-1}^1 A_m(x) dx \quad (2-6)$$

$$M_{Bm} = \int_{-1}^1 x \cdot A_m(x) dx \quad (2-7)$$

以  $x_s$  表示支柱首部垂线和主体首部端点之间的距离，支柱水线面漂心距主体首部端点的距离  $L_{cf}$  表示如下：

$$L_{cf} = \frac{L_{sm}}{2} + x_s - \frac{M_{wm}}{A_{wm}} \quad (2-8)$$

8)

因此，支柱水线面面积一次矩可以表示为：



$$M_{wm} = A_{wm} \left( \frac{L_{Sm}}{2} + x_S - L_{cf} \right) \quad (2-9)$$

9)

一个片体下部潜体的排水体积为：

$$\nabla_{Bm} = \nabla_{pm} - A_{wm} h_{Sm} \quad (2-10)$$

10)

式中， $\nabla_{pm}$  为一个片体的排水体积。

纵倾时，初稳性高度  $GM_L$  为：

$$GM_L = BM_L + KB - KG \quad (2-11)$$

式中：

$BM_L$ —纵稳心半径；

$KB$ —为浮心至基线的高度；

$KG$ —为重心至基线的高度。

已知：

$$BM_L = \frac{1}{\nabla_{pm}} \int_{-1}^1 (x - x_f)^2 t_m(x) dx = \frac{1}{\nabla_{pm}} \left( I_{wp} - \frac{M_{wp}^2}{A_{wp}} \right) \quad (2-12)$$

片体的浮心高度  $KB$  为：

$$KB = \frac{1}{\nabla_{pm}} \left[ \nabla_{Bm} + \left( 2d_v + \frac{h_{Sm}}{2} \right) A_{wm} h_{Sm} \right] \quad (2-13)$$

13)

由式 (2-10) ~ (2-13)，支柱水线面面积二次矩为：

$$I_{wpm} = \frac{1}{\nabla_{pm}} (GM_L + KG) - \left[ \nabla_{Bm} + \left( 2d_v + \frac{h_{Sm}}{2} \right) A_{wpm} h_{Sm} \right] + \frac{M_{wpm}^2}{A_{wpm}} \quad (2-14)$$

主体的浮心离其首部端点的距离为  $L_{cb}$ ：

$$L_{cb} = \frac{L_{Bm}}{2} - \frac{1}{\nabla_p} \left[ \int_{-1}^1 x A_m(x) dx + h_s \int_{-1}^1 (x + c_s) t_m(x) dx \right] \quad (2-15)$$

15)

式中， $c_s$  为主体和支柱中横剖面间的纵向距离：

$$c_s = \frac{L_{Bm} - L_{Sm}}{2} - x_S$$

所以，由式 (2-7) 和式 (2-15)， $M_{Bm}$  可以表示为：

$$M_{Bm} = \nabla_{pm} \left( \frac{L_{Bm}}{2} - L_{cb} \right) - h_{Sm} \left[ M_{wpm} + \left( \frac{L_{Bm} - L_{Sm}}{2} - x_S \right) A_{wpm} \right] \quad (2-16)$$

16)

至此，如果知道排水体积  $\nabla_{pm}$ ，主体长度  $L_{Bm}$  和其最大横剖面面积  $A_{m0}$ （或最大半径或相当半径）及主体浮心离其首端点的距离  $L_{cb}$ ，支柱长度  $L_{Sm}$ ，最大厚度  $t_{m0}$  和支柱水线面积系数（或水线面面积  $A_w$ ）及水线面漂心离主体首端点的距离  $L_{cf}$ ，支柱沉深  $h_{sm}$ ，重心至基线的高度  $KG$  和初稳性高度  $GM_L$ ，利用式 (2-1) 和 (2-2) 就可以求得支柱水线方程和主体横剖面面积曲线方程。

$$A_{S1} = \frac{4C_w}{P}, \quad A_{S2} = A_{S1}(1 - 16C_1), \quad A_{S3} = 1 - A_{S1} - A_{S2}, \quad B_{S1} = 4A_{S1}C_{LCF}$$

$$A_{B1} = \frac{4C_P}{P}, \quad A_{B2} = 1 - A_{B1}, \quad B_{B1} = 4A_{B1}C_{LCB},$$

$$B_{S2} = B_{S3} = A_{B3} = B_{B2} = B_{B3} = 0$$

式中,  $C_w = \frac{A_{wm}}{t_{0m}L_{Sm}}, \quad C_{LCF} = \frac{M_{wm}}{A_{wm}L_{Sm}}, \quad C_1 = \frac{I_{wm}}{A_{wm}L_{Sm}^2}, \quad C_P = \frac{\nabla_{Bm}}{A_{0m}L_{Bm}},$

$$C_{LCB} = \frac{M_{Bm}}{A_{0m}L_{Bm}^2}$$

同时, 在已确定支柱水线方程的情况下, 如果知道横稳性高度  $GM_T$ , 还可以求得两个片体之间的距离。

已知:

$$GM_T = BM_T + KB - KG$$

式中,  $BM_T$  为横稳心半径。

$$BM_T = \frac{1}{\nabla_p} \left[ \frac{1}{12} \int_{-1}^1 t^3(x) dx + \left( \frac{2b}{2} \right)^2 A_{wm} \right]$$

两个片体之间的距离  $2b$  为:

$$2b = 2 \sqrt{\frac{1}{A_{wpm}} \left[ \nabla_{pm} (GM_T - KB + KG) - \frac{1}{12} \int_{-1}^1 t^3(x) dx \right]}$$

在新船的方案构思和概念设计阶段, 主尺度的选择是首先要考虑的最基本问题。该小水线面双体船船型独特的设计理念决定了主尺度的选择也需要采用非常规的方法。由于在设计过程中, 一般船舶设计的任务书是不会给出所有这些参数的, 因此需要利用船舶设计中通常采用的母型法和一些统计资料来确定该设计方案所需要的参数, 再按照相应的方法来拟合小水线面双体船的线型。

在参考文献[36]中具体讨论了主体长度、支柱长度及最大厚度等小水线面双体船主尺度在初步设计中的估算方法。

$$L_{Sm} = \begin{cases} (1.04 \sim 1.08)L_{Bm}, \\ (0.78 \sim 0.93)L_{Bm}, \end{cases}$$

$$L_{Bm} = \begin{cases} (4.8 \sim 5.05)\Delta_m^{1/3}, \\ (4.5 \sim 5.0)\Delta_m^{1/3}, \\ (3.8 \sim 4.0)\Delta_m^{1/3}, \end{cases}$$

$$KG = (1.1 \sim 1.3)T_m$$

$$t_{0m} \approx D_{0m} / 4$$

式中,  $h_s$  为支柱沉深。

同时, 依据参考文献[51]中小水线面双体船水线面积及其初稳性高度对排水量的变化趋势:

$$A_w = \begin{cases} 3.1\Delta^{1/2} + 0.04\Delta, \text{lineA} \\ 2.27\Delta^{1/2} + 0.03\Delta, \text{lineB} \end{cases}$$

对于低速小水线面双体船, 纵稳性高度可按下式估算:

$$GM_L = \frac{0.3048 \cdot L_s^2}{(1.763\Delta^{1/3} - 0.246\Delta^{1/2})^2}$$

对于中速小水线面双体船:

$$GM_L = \frac{0.3048 \cdot L_s^2}{(1.458\Delta^{1/3} - 0.202\Delta^{1/2})^2}$$

横稳性高度也可类似地表示为:

$$GM_R = (1.1 \sim 1.4) \cdot R_0$$

式中,

$$R_0 = \frac{0.3048 \cdot (2b)^1}{(1.188\Delta^{1/3} - 0.162\Delta^{1/2})^2}$$

通过上述的统计资料, 根据该小水线面双体船的基本要求初步确定主体参数如表 2.1 所示:

表 2.1 小水线面双体船的主体参数  
Tab.2.1 Parameters of main hull of SWATH Vessel

主体潜体参数	
主体长度 $L_B$ (m)	32.40
主体进流段长度 $L_{BE}$ (m)	6.48
主体平行中体长度 $L_{BP}$ (m)	17.82
主体横中剖面直径 $D_B$ (m)	2.02
主体长径比 $L_B / D_B$	16.02
主体湿表面积 $S_B$ (m <sup>2</sup> )	419.78
主体支柱参数	
支柱长度 $L_s$ (m)	25.92
支柱进流段长度 $L_{SE}$ (m)	8.10
支柱平行中体长度 $L_{SP}$ (m)	12.96
支柱最大厚度 $t_s$ (m)	1.00
支柱长度/最大厚度比 $L_s / t_s$	25.92
支柱高度 $H_s$ (m)	2.64
总体参数	
总长 $L_{OA}$ (m)	37.20
垂线间长 $L_{BP}$ (m)	34.60
型宽 $B$ (m)	16.70
型深 $D$ (m)	8.80
设计吃水 $T$ (m)	3.24
设计排水量 $\Delta(t)$	233.60

在主船体尺度要素大致确定后, 可先参照国内、外已发表的小水线面双体船方案设计资料, 并在后续的理论计算中反复验证, 对水下潜体的尺度要素做进一步调整。

## 2.5 小水线面双体船的空船重量、载重量和航速的计算

根据已确定的主体尺度方案, 该小水线面双体船的空船重量、载重量的计算采用如下方法。

船舶漂浮于静水上的平衡条件是主体排水量等于空船重量  $LW$  与载重量  $DW$  之和, 即:

$$= LW + DW$$

式中, 为全船排水量,  $LW$  为空船重量,  $DW$  为载重量。

以下对  $LW$ 、 $DW$  分别进行估算:

### 1) 空船重量 $LW$

空船重量又可分解为船体结构重量  $W_H$ 、舾装重量  $W_O$  和机电设备重量  $W_M$  三大部分, 即:

$$LW = W_H + W_O + W_M$$

a. 船体结构重量  $W_H$ : 由于缺乏小水线面双体船船体结构重量方面可靠的统计资料, 故可应用立方模数法的概念, 假定船体结构各部分重量与其体积成正比, 即:

$$W_H = d_B V_B + d_S V_S + d_{CB} V_{CB}, (t)$$

式中,  $V_B$ 、 $V_S$ 、 $V_{CB}$  分别为主体、支柱和横向连接桥的体积, 单位为  $m^3$ ,  $d_B$ 、 $d_S$  和  $d_{CB}$  分别是它们相应的结构密度系数, 单位为  $t/m^3$ 。

结构密度系数值应按下述方法确定: 先假定一组不同吨位的船体结构设计方案, 其在外载荷和局部载荷作用下各部位的应力值不超过许用应力。然后计算各主要板材和构件的重量, 如外板、纵舱壁、横舱壁、中间甲板、防挠材等重量, 以估算出总结构重量。再按各部分容积计算结构密度系数  $d$ 。

本文初步估算阶段, 根据参考文献[36]的建议, 取  $d_B = 0.11t/m^3$ ,  $d_S = 0.115t/m^3$ , 对于连接桥, 因为铝结构, 取  $d_{CB} = 0.045t/m^3$ 。

b. 舾装重量  $W_O$ : 这部分重量包括生活设备系统、木作、涂料、舾装等的重量。初步设计时, 本文采用下述公式计算, 单位为  $t$ :

$$W_O = 0.055 + 0.011 V_{CB}$$

c. 机电设备重量  $W_M$ : 根据参考文献[80]的统计, 机电设备的重量可以近似地按主机功率的平方根 ( $P_D^{0.5}$ ) 的关系进行换算。对于主机为柴油机的机电设备重量  $W_M$  可用下式进行估算:

$$W_M = C_M (P_D / 0.7355)^{0.5}$$

式中,  $P_D$  为主机功率, 单位为  $KW$ ,  $C_M$  为系数, 由于缺乏母型船关于机电设备重量的详细资料, 取  $C_M = 8$ 。

另外, 在估算空船重量时, 通常要考虑加一定的排水量裕度。鉴于在初步设计阶段, 排水量裕度取空船重量的 4%。

### 2) 载重量计算 $DW$

载重量包括货物、人员、行李、食品、淡水、燃油以及备品和供应品等项目的重量, 如果满载设计状态还有压载水的话, 则还包括压载水的重量。按照设计任务书要求及装载情况进行计算。

### 3) 航速估算 $V_S$

借鉴参考文献[74]采用根据主机功率  $P_S$  求航速的方法。根据参考文献[75]提及的与文中主尺度、排水量相当的“Starflyte”号小水线面双体船, 在初步设计阶段, 对该小水线面双体船采取与“Starflyte”号同样的主机配置方案, 即采用 2 台 Deutz MWM TBD 620 V8 柴油机 ( $2 \times 1016kW$ ), 主机耗油率  $198 \text{ 克/}$

小时。

根据主机功率  $P_s$  进行航速估算步骤如下：

a. 求得一初估航速  $V_k$ ,  $V_k$  可参考 “Starflyte ” 的功率与航速估算图；

b. 取三个假定航速  $V_1 = V_k - 1$ ,  $V_2 = V_k$ ,  $V_3 = V_k + 1$ ；

c. 按照上述方法算出与 3 个航速相对应的 3 个主机功率，从而绘制出如图 2.3 所示的主机功率  $P_s$ —航速  $V_s$  曲线；

d. 根据主机实有功率求得船的航速。计算时采用三点插值法求得航速。

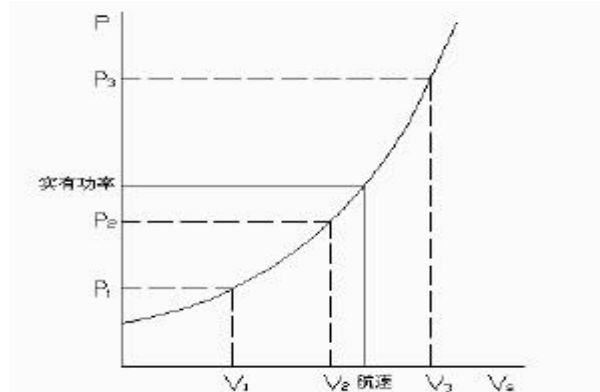


图 2.3 主机功率  $P_s$ —航速  $V_s$  曲线

Fig.2.3 Curve of main engine power and service speed

## 2.6 小水线面双体船的主体型线设计

### 2.6.1 MAXSURF 软件系统简介

本文小水线面双体船的型线设计基于母型改造法，并采用澳大利亚的 MAXSURF 软件系统进行型线光顺、建立模型。

MAXSURF 软件是由澳大利亚 FORMATION DESIGN SYSTEMS 公司为船舶设计和建造者开发的、适用于各种船舶设计、分析和建造的一套非常完整的计算机辅助船舶设计和建造软件。MAXSURF 软件目前在全球已拥有广泛分布在澳大利亚、中国、日本、德国、荷兰、新加坡、美国等国家的 1000 多位船舶设计和建造用户，在各种船舶设计和建造领域都得到了非常普遍的应用。

MAXSURF 软件系统包括以下几个模块：

- (1) MAXSURF 模块（动态三维船体模型生成模块）
- (2) HULLSPEED 模块（船舶阻力及有效马力计算模块）
- (3) HYDROMAX 模块（船舶水动力性能计算分析模块）
- (4) WORKSHOP 模块（船体结构生产放样及 CAD 图形生成模块）
- (5) SEAKEEPER 模块（船舶耐波性能分析模块）
- (6) PREFIT 模块（空间实体自动拟合模块）
- (7) SPAN 模块（帆船性能分析模块）
- (8) HYDROLINK 模块（数据转换模块）

### 2.6.2 MAXSURF 及 HYDROMAX 模块的主要功能

MAXSURF 模块是 MAXSURF 软件包的核心部分。MAXSURF 模块包括一整套用一个或多个真正的三维 NURBS 曲面（而非二维 NURBS 曲线），进行三维船体建模的工具，可使船舶设计师快速、精确地设计并优化出各种船舶的主

船体、上层建筑和附体型线。

MAXSURF 采用实时交互式控制方法,备有多种方法可对船体曲面和线型进行修改。设计者可在多窗口图形显示界面环境下,用鼠标拖放控制点进行数值修改,或从数据输入框直接输入数值进行修改,也可以通过一系列的自动光顺命令进行控制。设计者可根据具体设计船型以及实际生产情况,确定建立模型所使用 NURBS 曲面的数量、特性以及相互间的组织关系等。

MAXSURF 独特的曲面修整功能使设计者建立复杂的曲面边缘变得格外的简便。MAXSURF 交互式地显示出表面之间的交线,使设计者可以设计出复杂的船舶及附体型线,如各种折角线型、全可展简易线型、流线型上层建筑、大型货舱罐、烟囱、桅杆、护舷、挡浪板、球鼻艏、球艏、双尾和双尾鳍、涡艏和不对称艏、舷弧、梁拱、艏封板、隧道和半隧道、锚穴、锚链筒、滚筒、尾鳍、舵、舵球、电力推进包、侧推器、导管、轴包套、轴支架、减摇鳍、水翼等。根据各单个曲面设计的修改,修整曲面形状可以自动更新,这使得设计者可以把精力完全集中到各单个曲面的优化设计上。MAXSURF 的这一功能还能很好地应用到特种船型和海洋结构工程物的设计领域,如单体、双体、多体高速船、水翼艇、气垫船、小水线面、半小水线面双体船、穿浪船、潜艇及其它水下兵器、浮船坞、浮标、半潜式海洋石油平台等。

鉴于船体外形的光顺精度对于优化船舶性能和满足施工建造的重要性,MAXSURF 提供了多角度、多层次、严谨的船体光顺性检验工具。这些工具包括:横剖面面积曲线检验图、圆滑度检验云图、高斯曲率检验云图、纵向曲率检验云图、横向曲率检验云图、凹凸度检验云图等。设计者通过运用这些检验工具,可以充分体现自己设计思想、保证船体外形设计的质量。

MAXSURF 模块还具备独特的自动搜索和仿射变换功能,即计算机辅助母型船改造功能。一种情况下,设计者根据船东要求建立初步的总体设计方案和 MAXSURF 模型后,需要进行多方案比较,即对重要的性能参数,如船舶的最大横剖面位置、平行中体长度、水线长度、船宽、吃水、排水量、方形系数、菱形系数、浮心和飘心的纵向坐标等,进行小范围内的进一步研究和优化,这就需要设计者快速、准确地建立与初步设计方案特征基本相似的方案模型系列。

MAXSURF 的自动搜索和仿射变换功能,就是解决上述问题的有效工具。设计者只要相应地一次或多次输入与母方案的性能参数差异不大的指标,MAXSURF 就能自动搜索出与设计者预想相符的新方案。应用上述功能所生成的系列模型,再结合 HULLSPEED、HYDROMAX、WORKSHOP、SEAKEEPER、PREFIT、SPAN 等模块,设计者就能非常方便地研究单个和多个参数的变化对船舶性能的影响,事半功倍地找到最优设计方案。另一种情况,在船舶设计的后续阶段,一旦发现前阶段的设计需要做小幅调整,为了保证设计的继承和稳定性,设计者也需要在短时间内对原设计进行必要的修改。

MAXSURF 的自动搜索和仿射变换功能就能大大减少设计者的修改和返工时间,提高设计效率。

所有的 MAXSURF 设计都储存在一个集成数据库内,该数据库可方便地被其他模块调用,进行进一步的性能分析和评估。MAXSURF 支持一系列的工业数据格式,可方便地与 Microsoft Excel 进行数据文件的交换,并可以 DXF 和 IGES 格式输入和输出,与其它 CAD/CAM 软件进行数据文件的交换。

总之,MAXSURF 模块能使优秀的船舶设计者既可以很好地继承经典的船舶设计原理和思想,又能充分体现自己的设计风格和创造性,做出一流的总体

设计方案。

HYDROMAX 是一个功能强大的完整和破损情况下的稳性分析模块。其主要分析计算功能包括：各种载况下的重量重心数据统计计算、平衡浮态计算、特种工况（下水、进坞、搁浅等）计算、舱室定义和划分、舱容计算、静水力计算、稳性插值曲线计算、标准稳性校核、大倾角稳性校核、破舱稳性校核、极限重心高度计算、总纵强度校核等。

HYDROMAX 可直接应用 MAXSURF 中的裸体和全附体三维模型。设计者根据设计船特征和所入船级和规范，灵活划分并定义各种装载舱室，选择计算标准。HYDROMAX 模块可以支持多种标准，如 IMO、HSC Monohull、HSC Multihull、Marpol 73、US Navy、USL 等。设计者还可对一些关键的参数，如货物的物理特性、局部集中载荷、船舶浮态、波浪特性、舱室的渗透率、稳性曲线特征等进行强行定义。本文在对 SWATH 船进行稳性校核时，采用 IMO A.749（18）Code on Intact Criterion、IMO A.562 Code on Weather Criteria 以及 MSC.36（63）HSC Code，得到了可靠的结果。

HYDROMAX 的计算结果可以自动生成各种表格和图线以及完整的用户报告。这些报告可以被直接用作计算说明书、完工交船和送船级社审查的证件和资料。

### 2.6.3 小水线面双体船的主体型线设计结果

如图 2.4~2.7 所示为小水线面双体船的型线设计及模型输出结果。

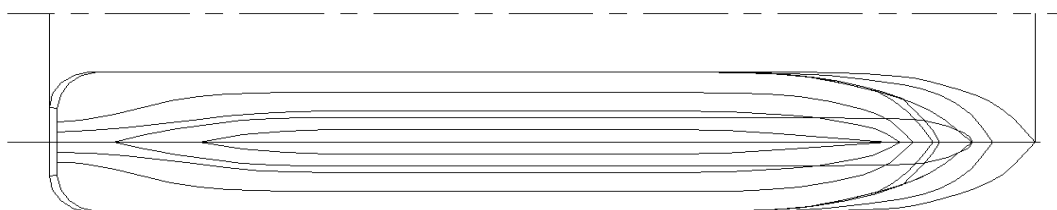


图 2.4 小水线面双体船主体型线图(a)  
Fig.2.4 The Line of the Main Hull of SWATH

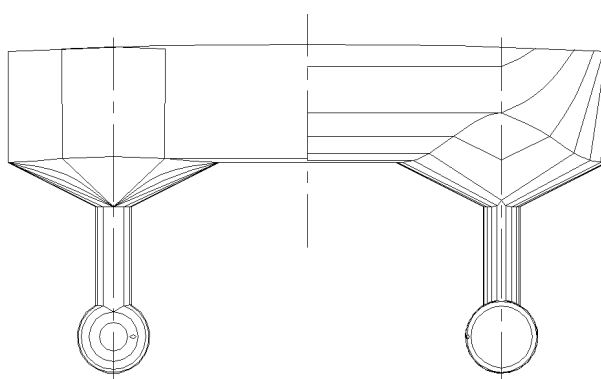


图 2.5 小水线面双体船主体型线图(b)  
Fig.2.5 The Line of the Main Hull of SWATH



图 2.6 小水线面双体船主体型线图(c)  
Fig.2.6 The Line of the Main Hull of SWATH

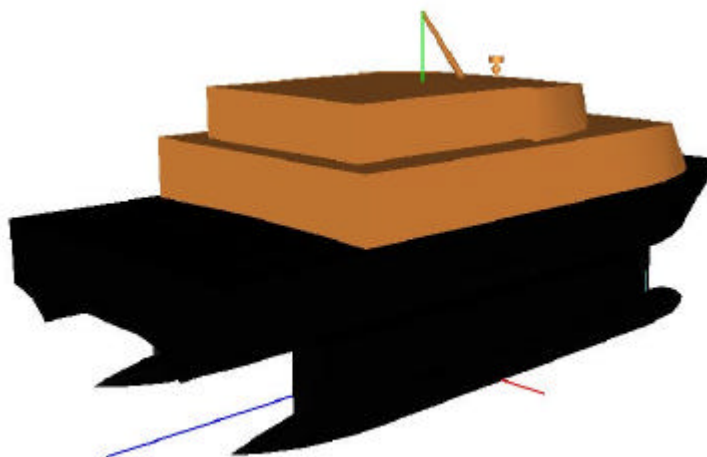


图 2.7 小水线面双体船模型输出结果  
Fig.2.7 The Model Output of SWATH Vessel

## 2.7 小水线面双体船的设计方案

### 2.7.1 总布置设计

本文的小水线面双体船总布置设计参考了日本“海鸥”号小水线面双体客船。具体布置情况见图 2.8~图 2.10，如下所述：

#### 1) 主船体舱内布置概况

本船全船肋距 1620mm，主船体在 $\# 2\frac{1}{2}$ 、 $\# 6$ 、 $\# 8$ 、 $\# 12$ 、 $\# 16\frac{1}{2}$ 肋位处设置 5 道水密舱壁，自艏至艮依次为清水舱（ $\# 2\frac{1}{2} \sim \# 3\frac{1}{2}$ ）、空调机舱（ $\# 2\frac{1}{2} \sim \# 6$ ）、货舱（ $\# 6 \sim \# 8$ ）、发电机舱（ $\# 8 \sim \# 11\frac{1}{2}$ ）、燃油舱（ $\# 11\frac{1}{2} \sim \# 13$ ）和主机舱（ $\# 11\frac{1}{2} \sim \# 16$ ）。另外，为了保证调整全船的纵倾并改善稳性性能，在主船体的首尾加设压载舱，即首压载舱（ $\# 0 \sim \# 2\frac{1}{2}$ ）、尾压载舱（ $\# 16 \sim \# 18$ ）。

#### 2) 水下潜体舱内布置概况

两个水下潜体均在 $\# 2\frac{1}{2}$ 、 $\# 6$ 、 $\# 8$ 、 $\# 12$ 、 $\# 16\frac{1}{2}$ 设置 5 道水密舱壁，



艄12~艄16 $\frac{1}{2}$ 为电动喷水推进机舱。

### 3) 上层建筑布置概况

本船设置两层甲板，自下而上分别是乘客（主）甲板、操纵甲板，乘客（主）甲板距操纵甲板的高度为2.97米。

### 4) 乘客（主）甲板布置情况：

从艄2~艄16 $\frac{1}{2}$ 设有客舱，预计载客270人，设有卫生间（2个）、小卖部（1间）、2人船员居住室2间、储物间（1间）、配餐间（1间）、风机室（1间）。

### 5) 操纵甲板布置情况：

从艄9~艄15 $\frac{1}{2}$ 为上层客舱，预计载客30人，艄5~艄9为驾驶室，另设有单人船员室（2间）、卫生间（1间）和储藏间（1间）。

如表2.2~2.5所示为小水线面双体船的主体中液体舱室的舱容计算表：

表2.2 首压载舱的舱容计算表

Tab.2.2 Tank Soundings for Forepeak Containing Fresh Water as Ballast

液位高 (cm)	液体体积 (m <sup>3</sup> )	液体重量 (MT)	重心纵向坐标 (m)	重心横向坐标 (m)	重心垂向坐标 (m)	自由液面惯性矩 (MT-m)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.00
50.0	2.33	2.33	13.390f	0.000	0.338	225.74
100.0	7.93	7.93	13.697f	0.000	0.657	310.53
150.0	13.62	13.62	13.757f	0.000	0.890	231.81
200.0	16.16	16.16	13.702f	0.000	1.012	1.96
250.0	16.21	16.21	13.698f	0.000	1.016	1.70
300.0	16.26	16.26	13.694f	0.000	1.021	1.68
FULL	16.28	16.28	13.693f	0.000	1.024	1.67

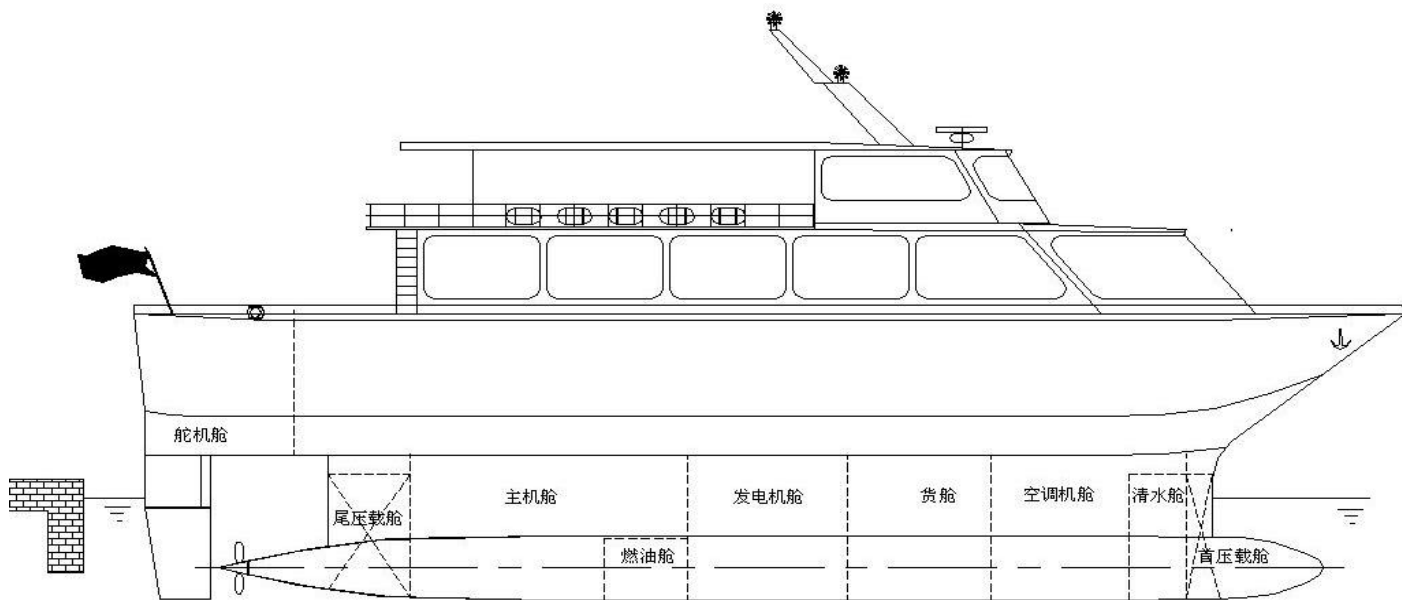


图 2.8 小水线面双体船的方案总布置图(A)  
Fig.2.8 The General Arrangement of SWATH

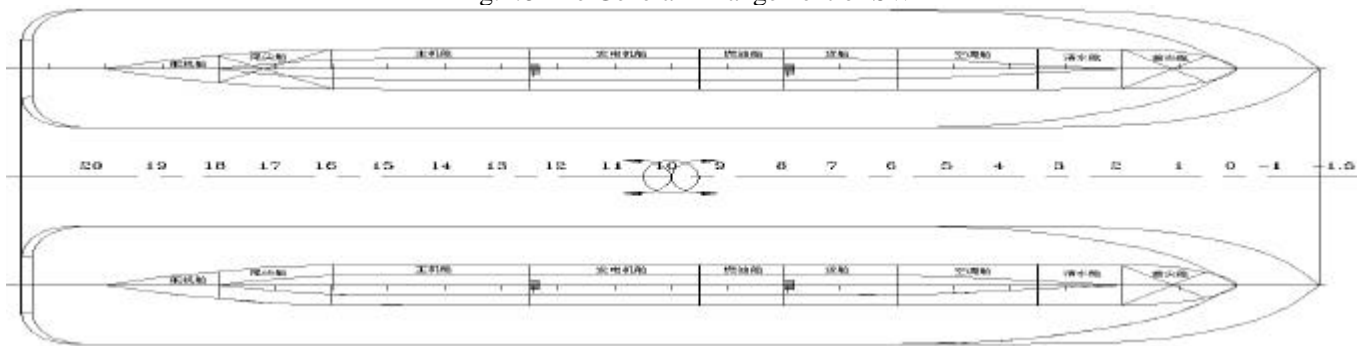


图 2.9 小水线面双体船的方案总布置图(B)  
Fig.2.9 The General Arrangement of SWATH

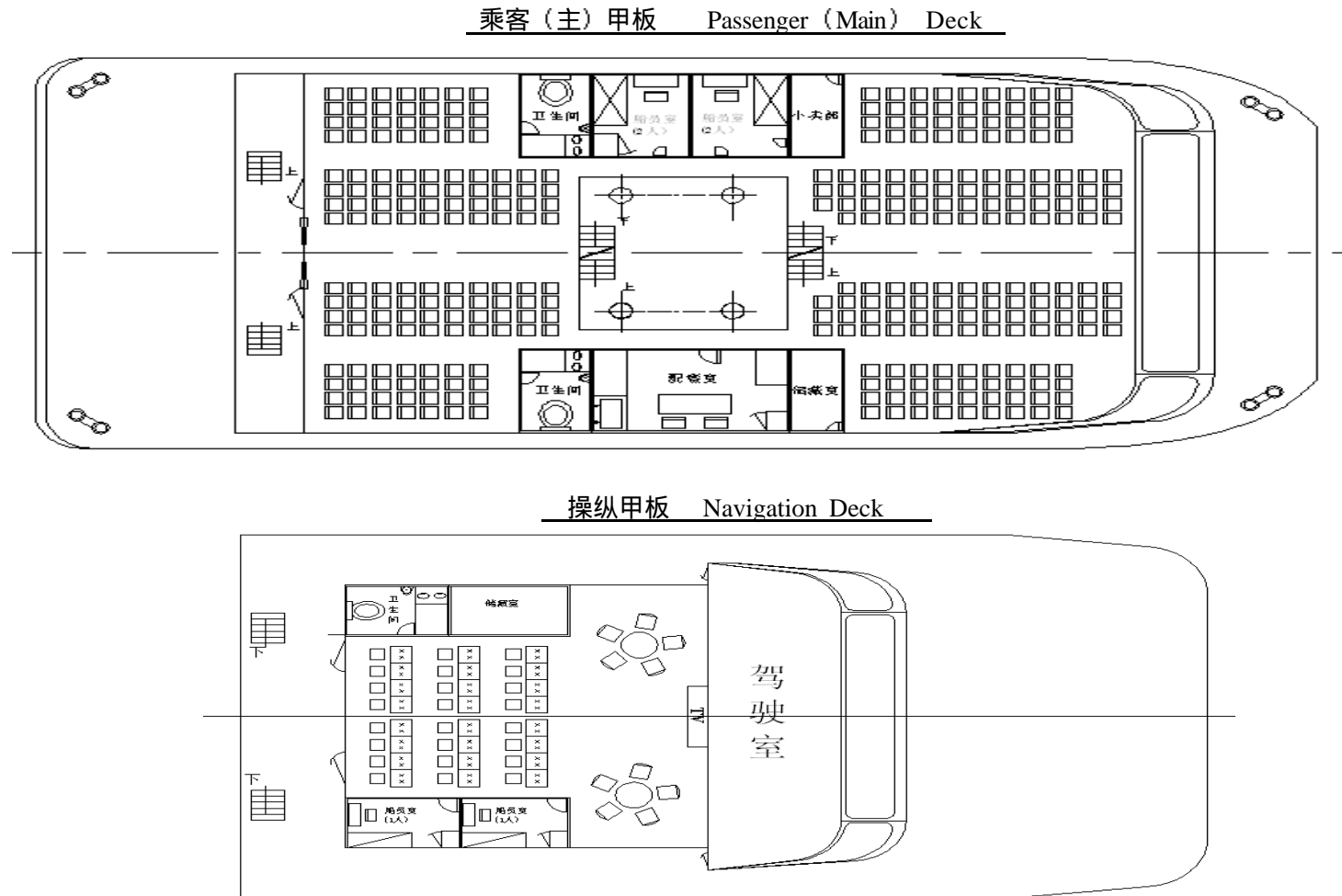


图 2.10 小水线面双体船的方案总布置图(C)  
Fig.2.10 The General Arrangement of SWATH

表 2.3 清水舱的舱容计算表

Tab.2.3 Tank Soundings for Tank Containing Fresh Water

液位高 (cm)	液体体积 (m <sup>3</sup> )	液体重量 (MT)	重心纵向坐标 (m)	重心横向坐标 (m)	重心垂向坐标 (m)	自由液面惯性矩 (MT-m)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.00
50.0	1.83	1.83	11.337f	0.000	0.302	157.62
100.0	4.84	4.84	11.338f	0.000	0.584	188.02
150.0	7.87	7.87	11.339f	0.000	0.838	160.75
200.0	9.84	9.84	11.338f	0.000	1.012	26.31
250.0	10.25	10.25	11.333f	0.000	1.062	23.55
300.0	10.66	10.66	11.327f	0.000	1.127	23.55
FULL	10.83	10.83	11.325f	0.000	1.157	23.55

表 2.4 燃油舱的舱容计算表

Tab.2.4 Tank Soundings for Tank Containing Fuel

液位高 (cm)	液体体积 (m <sup>3</sup> )	液体重量 (MT)	重心纵向坐标 (m)	重心横向坐标 (m)	重心垂向坐标 (m)	自由液面惯性矩 (MT-m)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.00
50.0	2.91	2.41	3.646a	0.000	0.296	200.77
100.0	7.49	6.22	3.646a	0.000	0.577	237.86
FULL	10.34	8.58	3.646a	0.000	0.735	224.78

表 2.5 尾压载舱的舱容计算表

Tab.2.5 Tank Soundings for Aftpeak Containing Fresh Water as Ballast

液位高 (cm)	液体体积 (m <sup>3</sup> )	液体重量 (MT)	重心纵向坐标 (m)	重心横向坐标 (m)	重心垂向坐标 (m)	自由液面惯性矩 (MT-m)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50.0	3.40	3.40	11.955a	0.000	0.532	291.66
100.0	9.36	9.36	12.372a	0.000	0.825	304.77
150.0	13.11	13.11	12.291a	0.000	0.996	64.98
200.0	14.11	14.11	12.224a	0.000	1.063	45.36
250.0	15.08	15.08	12.169a	0.000	1.153	45.32
300.0	16.04	16.04	12.121a	0.000	1.261	45.28
FULL	15.98	15.98	12.123a	0.000	1.254	45.28

## 2.7.2 船型系数计算

如表 2.6、图 2.11 分别为该小水线面双体船的船型系数表及船型系数图：

表 2.6 SWATH 船的船型系数表  
Tab.2.6 Hull Form Coefficients of SWATH Vessel

吃水 m	型排水体积 m <sup>3</sup>	系数					湿表面积 m <sup>2</sup>
		棱形系数	方形系数	横剖面系数	水线面系数	垂向棱形系数	
1.011	88.224	0.831	0.203	0.244	0.283	0.718	183.88
2.022	179.003	0.830	0.207	0.250	0.058	3.567	421.13
2.240	188.526	0.818	0.197	0.241	0.112	1.761	448.67
2.340	192.894	0.813	0.193	0.238	0.112	1.725	458.73
2.440	197.261	0.809	0.189	0.234	0.112	1.692	468.79
2.540	201.630	0.804	0.186	0.231	0.112	1.662	478.85
2.640	205.998	0.800	0.183	0.229	0.112	1.634	488.91
2.740	210.366	0.797	0.180	0.226	0.112	1.608	498.97
2.840	214.735	0.793	0.177	0.224	0.112	1.584	509.03
2.940	219.102	0.790	0.175	0.221	0.112	1.562	519.09
3.040	223.470	0.786	0.172	0.219	0.112	1.541	529.15
3.140	227.839	0.783	0.170	0.217	0.112	1.521	539.21
3.240	232.207	0.780	0.168	0.216	0.112	1.502	549.27
3.340	236.575	0.777	0.166	0.214	0.112	1.485	559.33
3.440	240.942	0.774	0.164	0.212	0.112	1.469	569.39
3.540	245.311	0.772	0.163	0.211	0.112	1.453	579.45
3.640	249.679	0.769	0.161	0.209	0.112	1.439	589.51
3.740	254.047	0.767	0.160	0.208	0.112	1.425	599.57
3.840	258.416	0.765	0.158	0.207	0.112	1.412	609.63
3.940	262.783	0.762	0.157	0.206	0.112	1.399	619.69
4.040	267.151	0.760	0.155	0.204	0.112	1.387	629.75
4.140	271.519	0.758	0.154	0.203	0.112	1.376	639.81
4.240	275.888	0.756	0.153	0.202	0.112	1.365	649.87

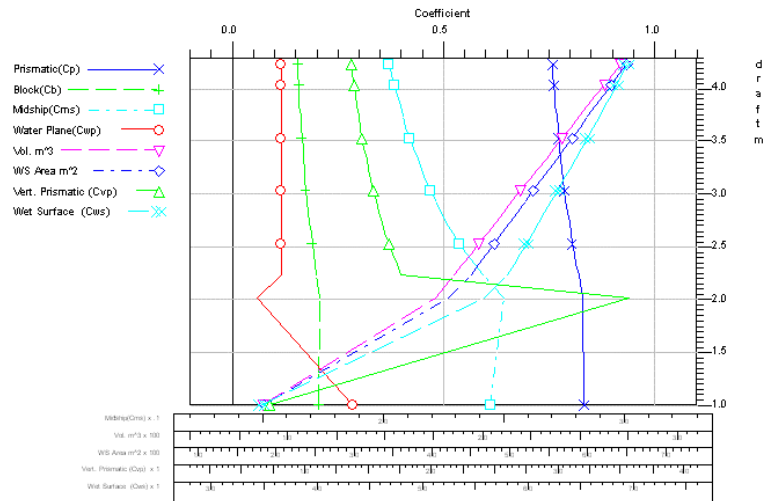


图 2.11 SWATH 船的船型系数图  
Fig.2.11 Hull Form Coefficients of SWATH Vessel

2.8 小水线面双体船的重量重心估算

本文针对确定的主体尺度要素以及总布置设计及要求，估算空船总量，并计算载重量。该小水线面双体船满载出港状态的重量和重心估算结果见表 2.7，船首方向为纵轴正方向。

表2.7 小水线面双体船的重量重心估算

Tab.2.7 Results of weight and center of gravity calculation

项目		重量(t)	重心纵向坐标(m)	重心高度(m)
空船重量 LW	船体结构重量	80.885	-0.600	7.184
	木作舾装	30.878		6.486
	机电设备	42.541		4.992
	共计 Ó	154.304	-0.600	6.440
载重量 DW	人员及行李	22.800	1.771	10.23
	食品	0.322	0.563	9.876
	备品、供应品	2.400	1.014	5.902
	货物	3.200	1.049	2.300
	首压载水	15.280	3.113	1.782
	清水	10.830		1.993
	燃油	9.484		0.784
	尾压载水	14.980		1.792
	共计 Ó	79.296	2.570	4.298
全船	总空船重量	154.304	-0.600	6.440
	总载重量	79.296	2.570	4.298
	共计 Ó	233.600	0.476	5.71

2.9 小水线面双体船的浮态

根据该小水线面双体船方案设计的主尺度、总布置方案、以及空船重量、载重量的计算，SWATH 船的满载出港浮态如图 2.12 所示。首吃水  $T_F=2.49$  米，尾吃水  $T_A=3.85$  米，纵倾角  $\varphi=2.4^\circ$ ，横倾角  $\varphi=0^\circ$ 。

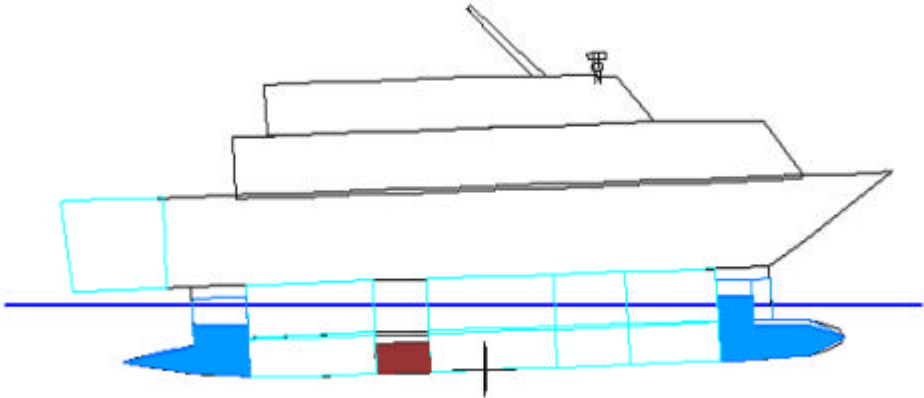


图 2.12 小水线面双体船的满载出港浮态

Fig.2.12 Floating Condition of SWATH Vessel when Fully Loaded

## 2.10 本章小结

本章对一型小水线面双体船展开方案设计，主要工作包括主体尺度要素方案确定、主体型线设计、总布置设计、重量重心估算。

通过设计过程中的工作，本人有以下几点体会：

1) 由于小水线面双体船船型的特殊性，使得在设计过程中采用的也必须是独特（case by case）的方法。首先将主船体与水下潜体分开考虑设计，从快速性角度并兼顾经济性确定主体主要尺度；考虑提供全船浮力的水下潜体时，则主要从稳性考虑，兼顾快速性、总布置等要求；最后，综合主船体和水下潜体分别的设计方案，进行全船的总布置设计。这种“先分离，后整合”的设计方法给多体船的设计带来清晰、有序的思路，提高了方案设计阶段的效率。主要设计流程见图 2.13。

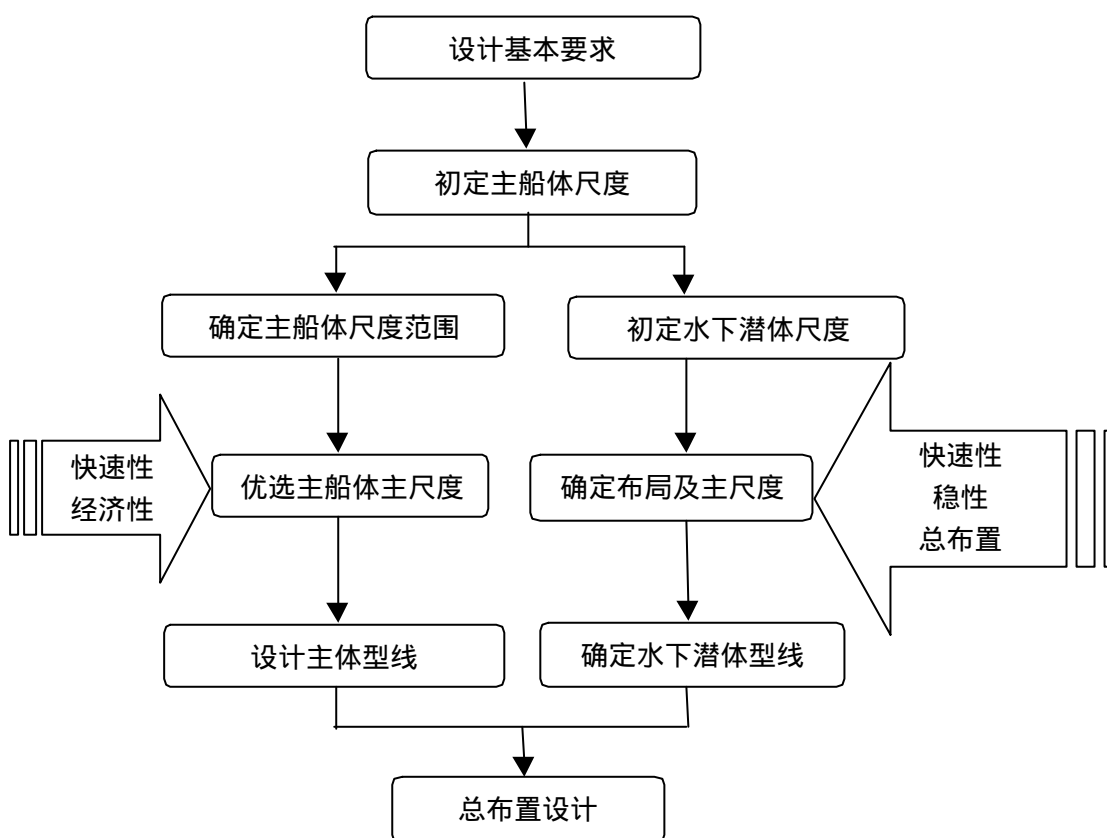


图 2.13 小水线面双体船的方案设计流程图

Fig.2.13 Procedure of Conceptual Design of SWATH

2) 在进行水下潜体的布局设计时，未考虑耐波性（横摇）、操纵性（回转性能）、以及主船体与潜体之间的兴波干扰等影响。所以，该小水线面双体船的设计方案尚有一定的完善空间。

## 第3章 小水线面双体船的稳性研究

### 3.1 引言

船舶在非排水状态营运时，应具有足以保证安全的稳性和稳定系统。并且船舶在排水状态营运时，应具有完整和破损情况下足以保证安全的浮力和稳性，因此，满足稳性要求是多体船型设计开发的基本前提。

小水线面双体船的稳性问题可分为完整稳性和破舱稳性两部分。破舱稳性较好也是小水线面双体船的一个独特优势。

### 3.2 小水线面双体船的稳性研究

对单体船而言，在主尺度初始确定阶段，稳性的校核通常是直接进行。这是因为一艘单体船的船型参数通常来自试验资料，这些资料是以大量的现有船型及其性能经验为基础。对初稳性高 $\overline{GM}$ 的校验通常通过调节船宽就可以满足要求。

然而对小水线面双体船稳性的设计却不可能这么直接，因为小水线面双体船结构复杂，现有的关于该船型稳性方面的资料和经验又太匮乏，由一次简单的 $\overline{GM}$ 校验来确定主船体和两个水下潜体的尺度要素显然不够。对一艘小水线面双体船而言，同一个 $\overline{GM}$ 值可以在由不同尺度、外形、位置形成的大量水下潜体方案中取得，结果这艘船就会有完全不同的稳性特征。由于水下潜体设计的选择余地很大，小水线面双体船在方案设计阶段应更加注重对稳性因素的考虑。

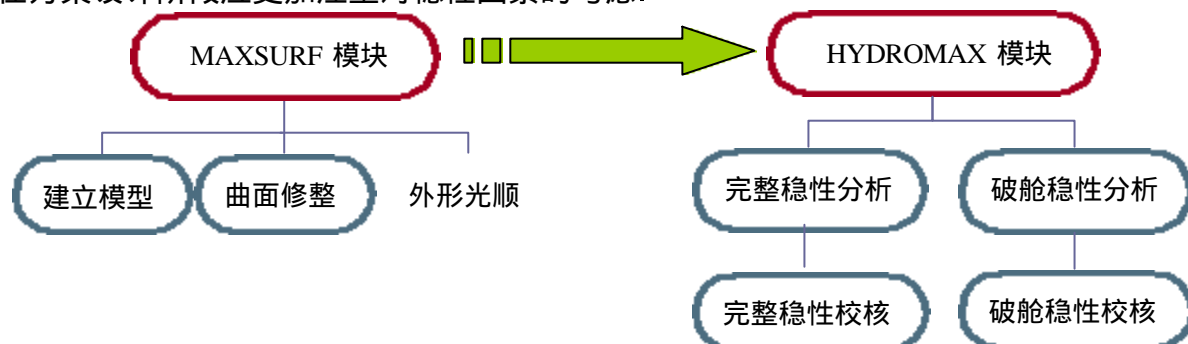


图 3.1 MAXSURF 软件初步设计模块应用流程图

Fig.3.1 Flow Chart of the Basic Design with MAXSURF

本文在研究小水线面双体船的稳性性能时，采用澳大利亚 MAXSURF 船舶设计软件建立模型，结合的 HYDROMAX 船舶水动力性能计算分析模块进行。图 3.1 为稳性性能分析的流程示意图。

下面简要说明应用 MAXSURF 模块、HYDROMAX 模块分析小水线面双体船稳性的步骤：

- 1) 在MAXSURF模块中采用多个真正的三维NURBS曲面完成新船型的三维设计和光顺后，进行对各单个曲面设计的修改，直到生成最为满意的三维模型；
- 2) 采用HYDROMAX模块进行完整和破损情况下的稳性分析，主要分析过程包括：静水力计算、稳性横截曲线计算、完整稳性校核、破舱稳性分析。

#### 3.2.1 初稳性高 $\overline{GM}$ 的计算方法



初稳性高  $GM$  的选取在小水线面双体船的设计中非常重要，一个恰当的  $GM$  值不仅需要满足船舶的稳性要求，而且必须保证良好的耐波性能。与单体船类似，研究小水线面双体船的初稳性时也不妨引入下列假定：

(1) 小倾角等体积倾斜轴线通过正浮水线面的漂心；

(2) 浮心移动曲线以初稳心  $M$  为圆心，初稳心半径  $BM$  为半径， $M$  点位置保持不变，浮力作用线始终通过  $M$ 。

本章根据参考文献[68]将  $WOW1$  和  $LOL1$  看作是中间有一段被掏空的楔形体，则  $BM$  可以表达为：

$$\overline{BM} = \frac{2(I_s + A_{ws}b^2)}{\nabla} \quad (3-1)$$

其中  $I_s$  为单个水下潜体正浮水线面对各自纵向中心轴线的惯性矩， $A_{ws}$  为水下潜体正浮水线面面积， $2b$  为水下潜体横向距离值，定义为跨距。

浮心高  $z_b$  可写成  $z_b = \frac{2\nabla_s z_{bs}}{\nabla}$ ，将  $z_b$  和  $\overline{BM}$  表达式代入  $\overline{GM} = z_b + \overline{BM} - z_g$ ，于是  $SWATH$  初稳性高  $GM$  可表达为：

$$\overline{GM} = \frac{2\nabla_s z_{bs}}{\nabla} + \frac{2(I_s + A_{ws}b^2)}{\nabla} - z_g \quad (3-2)$$

其中  $\nabla_s$ 、 $\nabla$  分别为单个水下潜体、全船正浮时的排水体积， $\nabla = 2\nabla_s$ ， $z_b$ 、 $z_{bs}$  分别为全船和水下潜体的浮心高， $z_g$  为全船重心高。

从(3-1)式可以看出，由于本文所研究的小水线面双体船型的  $I_s$  很小，这使得水下潜体对船中的惯性矩与  $A_{ws}b^2$  相比可以略去不计，即小水线面双体船的初稳性高度  $GM$  主要取决于两水下潜体之间的距离。

通过比较各个方案的水下潜体布局 and 尺度，逐一校验其稳性，最后决定水下潜体的中心距和尺度为：潜体中心距  $2b = 10.80\text{m}$ ，潜体最大宽度  $B_B = 2.02\text{m}$ ，潜体高度  $H_B = 1.88\text{m}$ ，潜体长度  $L_B = 32.40\text{m}$ 。

### 3.2.2 初稳性高 $GM$ 理想值的确定

初稳性高  $GM$  是衡量船舶初稳性的主要指标，小水线面双体船的取值既要满足相关稳性规范对其下限值的规定，又要避免取值过大而造成的船舶稳性不足。

船舶因波浪的作用而不断地获得能量，从而产生横摇。波浪对船舶横摇做功的大小，既决定于波浪扰动力的大小，也决定于波浪频率与横摇固有周期频率之间的关系。当扰动力和横摇合拍时，即波浪自然频率等于横摇固有频率时，扰动力矩的方向才在整个周期范围内和横摇方向一致，波浪对船做的功最多，横摇幅值最大，这种情况即为谐摇。

图 3.2 给出了船舶横摇放大因数与调谐因数的关系曲线，横坐标  $\Lambda\Phi$  为调谐因数，纵坐标  $\Phi_A/a_{mo}$  为放大因数，其中  $\Phi_A$  为横摇幅值， $a_{mo}$  为有效波倾。从图中可以看出，不仅在谐摇 ( $\Lambda\Phi = 1$ ) 时放大因数  $\Phi_A/a_{mo}$  很大，而且在  $\Lambda\Phi = 1$  附近的一定范围内  $\Phi_A/a_{mo}$  也是相当大的，通常称  $0.7 < \Lambda\Phi < 1.3$  的范围为谐摇区。

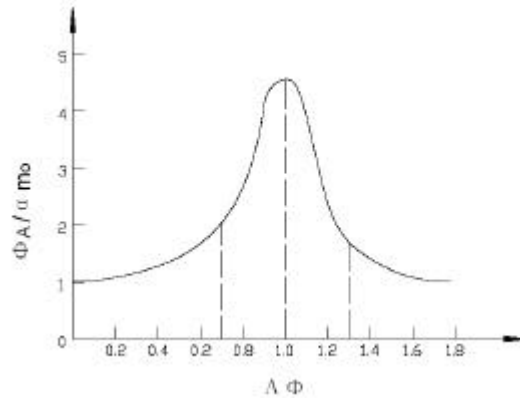


图 3.2 横摇放大因数与调谐因数的关系曲线

Fig.3.2 Roll amplification coefficient vs. tuning factor

根据船舶横摇调谐因数 $\Lambda\Phi$ 的定义， $\Lambda\Phi = \frac{\mathbf{w}}{\mathbf{w}_\Phi} = \frac{T_\Phi}{T}$ ，其中 $T_\Phi$ 为横摇固有周期，一般单体船的横摇固有周期可按下式计算：

$$T_\Phi = \frac{2\mathbf{p}}{\mathbf{w}_\Phi} = 2\mathbf{p} \sqrt{\frac{I'_{xx}}{\Delta \cdot GM}} \quad (3-3)$$

式中 $\Delta$ 为船的排水量， $GM$ 为船的初稳性高， $I'_{xx}$ 为横摇质量惯性矩。横摇固有周期 $T_\Phi$ 是船舶流体动力性能的重要参数，计算 $T_\Phi$ 的关键是计算横摇质量惯性矩 $I'_{xx}$ 。 $I'_{xx}$ 由船体本身惯性矩 $I_{xx}$ 和附连水的附加惯性矩 $J_{xx}$ 两部分构成，其中船体本身惯性矩 $I_{xx}$ 取决于船体的质量分布，在我国海船稳性规范中应用杜埃拉公式确定，取

$$I_{xx} = \frac{\Delta}{12g} (B^2 + 4z_g^2) \quad (3-4)$$

附加惯性矩 $J_{xx}$ 则取决于船体水下部分的形状及重心位置等因素。由船体的质量分布计算 $I_{xx}$ 或应用流体力学方法（三维衍射波计算机程序）计算 $J_{xx}$ 都是相当复杂的，工程实际中通常用经验公式进行估算，一般取 $I_{xx}$ 的20%~30%，而对于本文所研究的SWATH船，由于其左右两水下潜体尺度相同、结构左右对称， $J_{xx}$ 较单体船要大得多，根据前人进行的双体船试验，所得出的平均 $J_{xx}$ 大约为 $I_{xx}$ 的1.62倍。

杜埃尔公式假定船体质量均匀分布在具有与船体同样长度 $L$ 、宽度 $B$ 和高度 $2z_g$ 的直角平行六面体内， $z_g$ 为重心高度。那么这里利用杜埃尔假定，把小水线面双体船看作中间缺少一块的均质六面体，将公式（3-4）代入横摇固有周期公式（3-3），并且计入 $J_{xx}/I_{xx} = 1.62$ 即可得到小水线面双体船的横摇固有周期公式：

$$T_\Phi = 2\mathbf{p} \sqrt{\frac{2.62}{12g \cdot GM} (B_{\max}^2 + 4z_g^2)} \quad (3-5)$$

式中： $D$ 为船舶型深， $w$ 为两片体内侧的间距。

横摇调谐因数 $\Lambda\Phi = \frac{\mathbf{w}}{\mathbf{w}_\Phi} = \frac{T_\Phi}{T}$ 中的 $T$ 为遭遇波浪周期，由下式决定：

$$T = \frac{L_w}{\sqrt{\frac{gL_w}{2\mathbf{p}} - V_s \cos \mathbf{m}}} \quad (3-6)$$

其中  $L_w$  为波长， $V_s$  为船的航速， $i$  为航向角。

假如用GM理想值来表示能使一艘小水线面双体船获得良好耐波性能的值，那么得出一套运算法则来求出这个理想值是很困难的，因为影响该值的因素很多，包括航速、航向、波频、横摇阻尼、船舶尺度以及外形结构等。在选择GM理想值的过程中，需要考虑的一个重要因素是确保横摇调谐因数  $\Delta\Phi$  取得偏离1的合理值。

3.3 小水线面双体船的静水力计算

3.3.1 静水力曲线

本计算中，海水密度按 1.025kg/L 计算，浮心纵坐标及漂心纵坐标以船舳为原点，f 表示舳前，a 表示舳后；p 表示左舷，s 表示右舷；横稳心高、纵稳心高为距基线的高度；船型系数按相应吃水时的水线长、水线宽计算。

由于缺乏对小水线面双体船船壳板系数的统计资料，故按一般船壳系数取值为 1.006，该小水线面双体船方案的静水力曲线表如表 3.1，静水力曲线图如图 3.3。

表 3.1 静水力曲线表  
Tab.3.1 Hydrostatic Data

吃水	排水量	浮心纵向坐标	浮心距基线高	漂心纵向坐标	每厘米吃水吨数	每度纵倾力矩	纵稳心高	横稳心高
T (m)	D (T)	Xb (m)	Zb (m)	Xf (m)	(T/cm)	(T·m/deg)	Zml (m)	Zm (m)
1.011	88.753	1.027f	0.600	0.766f	1.21	143.93	98.258	40.646
2.022	180.077	0.984f	1.024	0.691a	0.44	16.67	10.655	8.030
2.240	189.657	0.900f	1.080	0.690a	0.44	16.16	10.233	7.734
2.340	194.051	0.864f	1.108	0.690a	0.44	15.93	10.053	7.611
2.440	198.445	0.829f	1.136	0.690a	0.44	15.70	9.883	7.495
2.540	202.840	0.796f	1.165	0.690a	0.44	15.48	9.723	7.387
2.640	207.234	0.765f	1.196	0.690a	0.44	15.27	9.572	7.285
2.740	211.628	0.735f	1.227	0.690a	0.44	15.07	9.429	7.189
2.840	216.023	0.706f	1.258	0.690a	0.44	14.87	9.294	7.100
2.940	220.417	0.678f	1.291	0.690a	0.44	14.68	9.166	7.016
3.040	224.811	0.651f	1.324	0.690a	0.44	14.50	9.045	6.937
3.140	229.206	0.625f	1.358	0.690a	0.44	14.33	8.931	6.863
3.240	233.600	0.601f	1.392	0.690a	0.44	14.16	8.823	6.794
3.340	237.994	0.577f	1.427	0.690a	0.44	14.00	8.721	6.730
3.440	242.388	0.554f	1.463	0.690a	0.44	13.85	8.624	6.669
3.540	246.783	0.532f	1.499	0.690a	0.44	13.71	8.533	6.612
3.640	251.177	0.510f	1.535	0.690a	0.44	13.57	8.446	6.560
3.740	255.571	0.490f	1.573	0.690a	0.44	13.45	8.364	6.510
3.840	259.966	0.470f	1.610	0.690a	0.44	13.33	8.287	6.464
3.940	264.360	0.450f	1.648	0.690a	0.44	13.22	8.214	6.421
4.040	268.754	0.432f	1.686	0.690a	0.44	13.11	8.145	6.382
4.140	273.148	0.414f	1.725	0.690a	0.44	13.01	8.080	6.345
4.240	277.543	0.396f	1.764	0.690a	0.44	12.93	8.018	6.311

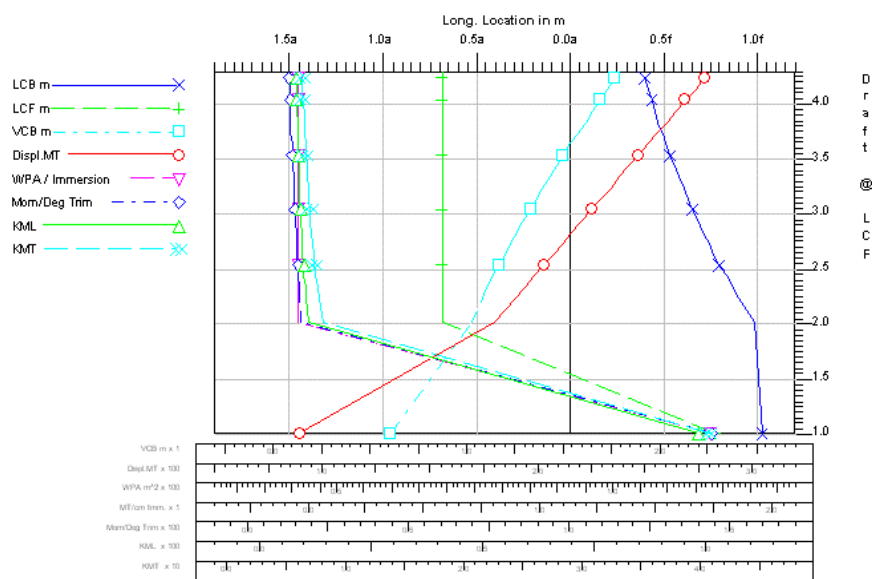


图 3.3 静水力曲线图  
Fig.3.3 Hydrostatic Curves

### 3.3.2 横稳性力臂曲线

当横倾角很小时，仍是用重心和横稳心之间的垂向距离，即用初横稳心高度  $GM$  来衡量的。如图 3.4 所示为衡量小水线面双体船满载时的横稳性力臂曲线。当横倾角很小时，横稳性力臂很小，这与常规单体船类似，但是当横倾角达到  $15^\circ$  后，由于支柱水线以上部分外漂和横向连接桥进水，浮心迅速向倾侧方向移动，以致使横稳性力臂迅速增大，横倾角达到  $28^\circ$  时，横稳性力臂达到最大值，当横倾角继续增大至  $33.7^\circ$  时，甲板开始进水，横稳性力臂迅速下降。

由于双体客船有两个分开的片体，中间通过联接桥连结从而形成宽敞的甲板，因此给人的直观感觉就是稳性很好，不容易倾复。但仔细分析，可以看到双体船有一个致命的弱点，就是在满足情况下，进水角都很小，从而使其稳性也难得到保证，对某些设计欠妥的船舶，如果进水角小于横摇角，则稳性就不满足。

小水线面双体船船型的主要特点是稳性范围宽，在大角度横倾时有足够的稳性，并且具有较大的  $GM$  值，这也是小水线面双体船被广泛用于水上客运的主要优势之一。

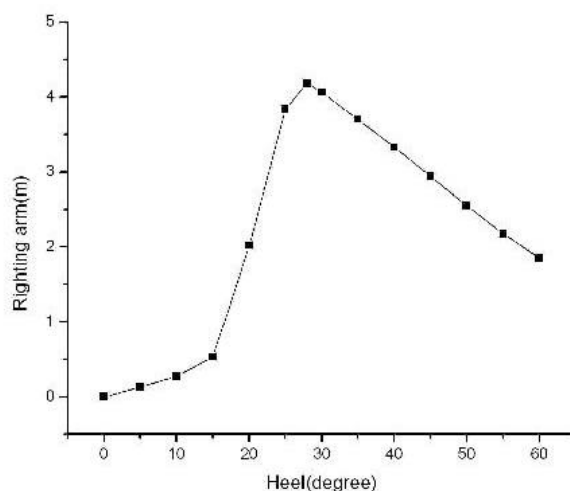


图 3.4 小水线面双体船在设计水线下的静稳性曲线  
Fig.3.4 GZ-ÖCurves under DWL

3.3.3 稳性横截曲线

对该小水线面双体船绘制基于基点的稳性横截曲线（Cross Curves of Stability），如表 3.2 及图 3.5。

表 3.2 小水线面双体船横倾的计算结果

Tab.3.2 Output of SWATH Heel Calculation

Displ (MT)	10s	20s	30s	40s	50s	60s	70s	80s
88.753	4.508s	3.599s	2.526s	1.385s	0.219s	-0.025s	1.387s	3.026s
180.077	0.873s	2.292s	3.541s	2.740s	1.932s	1.260s	1.664s	2.263s
189.657	0.682s	2.203s	3.656s	2.866s	2.062s	1.385s	1.671s	2.202s
194.051	0.606s	2.179s	3.706s	2.921s	2.118s	1.440s	1.674s	2.176s
198.445	0.537s	2.161s	3.754s	2.974s	2.172s	1.492s	1.676s	2.150s
202.840	0.475s	2.145s	3.800s	3.024s	2.225s	1.542s	1.679s	2.125s
207.234	0.417s	2.133s	3.843s	3.073s	2.276s	1.591s	1.681s	2.099s
211.628	0.369s	2.122s	3.885s	3.120s	2.325s	1.638s	1.683s	2.073s
216.023	0.333s	2.112s	3.926s	3.164s	2.374s	1.684s	1.685s	2.047s
220.417	0.309s	2.103s	3.965s	3.209s	2.420s	1.729s	1.687s	2.022s
224.811	0.294s	2.096s	4.003s	3.252s	2.464s	1.772s	1.689s	1.997s
229.206	0.280s	2.090s	4.037s	3.293s	2.507s	1.814s	1.691s	1.972s
233.600	0.267s	2.086s	4.071s	3.334s	2.549s	1.855s	1.693s	1.948s
237.994	0.254s	2.084s	4.104s	3.373s	2.592s	1.895s	1.695s	1.924s
242.388	0.243s	2.082s	4.136s	3.412s	2.633s	1.934s	1.697s	1.900s
246.783	0.231s	2.080s	4.166s	3.449s	2.673s	1.972s	1.699s	1.879s
251.177	0.225s	2.080s	4.197s	3.485s	2.711s	2.009s	1.702s	1.856s
255.571	0.235s	2.080s	4.224s	3.521s	2.749s	2.045s	1.704s	1.834s
259.966	0.255s	2.081s	4.252s	3.555s	2.786s	2.080s	1.706s	1.813s
264.360	0.284s	2.082s	4.279s	3.588s	2.822s	2.114s	1.708s	1.792s
268.754	0.320s	2.084s	4.305s	3.620s	2.857s	2.147s	1.710s	1.772s
273.148	0.358s	2.087s	4.330s	3.651s	2.892s	2.178s	1.713s	1.752s
277.543	0.400s	2.090s	4.354s	3.682s	2.926s	2.209s	1.715s	1.732s

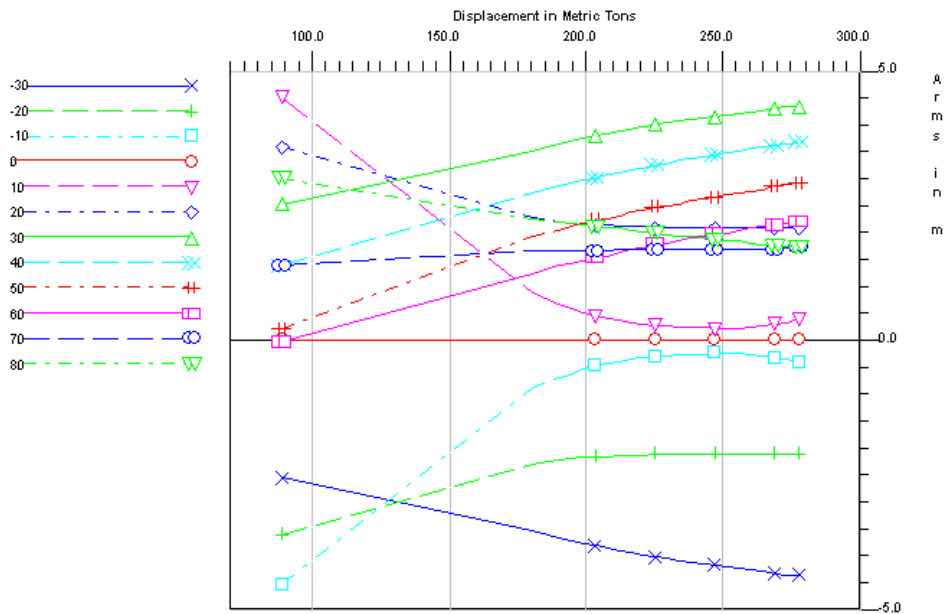


图 3.5 小水线面双体船的稳性横截曲线

Fig.3.5 Cross Curves of SWATH Stability

### 3.4 小水线面双体船的稳性衡准研究

根据参考文献[101], 就高速船的完整稳性衡准来说, 目前在国内进行设计、建造的此类船舶大都是按照 ZC 法规来计算, 而在国外设计、建造的船大都是按照国际海事组织 (IMO) 的 Resolution A.562 和 A.167 或 A.749 (18) 来进行计算。通过对实船分析比较发现, 双体船如进水角  $q_f$  超过横摇角  $q_1$   $2^\circ \sim 3^\circ$ , 则稳性衡准数  $K$  就可大于 1, 因此如  $q_f - q_1 \geq 5^\circ$ , 就可不必校核  $K$  值, 此外双体客船在满载出港时进水角最小, 在其他装载情况下, 进水角还是较大的, 所以只要校核这种情况下的稳性, 为了安全起见, 计算时进水角还应有  $1^\circ$  的余量。另外, 该小水线面双体船同飞机一样设有固定的座位, 航程也较短, 船上也没有很大的自由活动甲板, 不存在旅客集中一舷的情况, 所以不必单独校核这种情况下的稳性。

根据参考文献[81]、[95]~[98]对一般海船、多体船完整稳性、破损稳性等的规定, 对此小水线面双体船的稳性性能进行分析。

#### 3.4.1 完整状态下的一般稳性衡准

综合参考文献[81]、[95]~[98]中对海上航行船舶、多体船一般稳性衡准的要求, 对该小水线面双体船的设计方案进行完整稳性校验 (如表 3.3 所示)。在完整状态下, 船舶在海上横摇时, 应有足够的稳性, 以能承受乘客集中一舷或者高速回转的影响。如果满足本条要求则认为船舶的稳性是足够的。

根据 IMO (Resolution A.749(18))中的一般稳性衡准要求, 静稳性力臂曲线 (如图 3.6 所示) 应符合下列要求:

- $A_1$  的面积应不小于 0.055 m-rad;
- $A_2$  的面积应不小于 0.03 m-rad;
- $(A_1 + A_2)$  的面积之和的面积应不小于 0.09 m-rad;
- $30^\circ$  处的 GZ 值的面积应不小于 0.2m;
- 最大 GZ 值应在横倾角大于  $30^\circ$  处, 但不小于  $25^\circ$  处;
- $G_0M$  值应不小于 0.15 m。

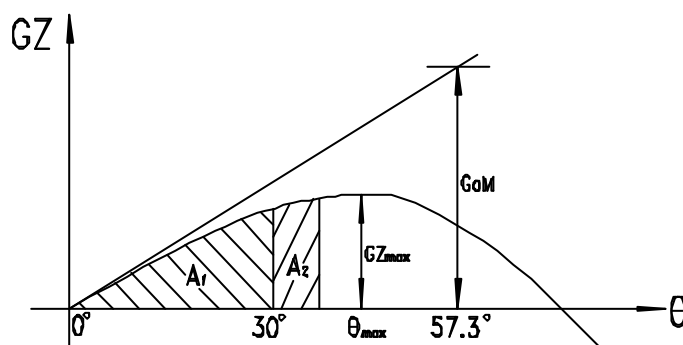


图 3.6 静稳性力臂曲线(一般稳性要求)

Fig. 3.6 Stability Curve (General Stability Requirements)

图 3.6 中,

$A_1$  — 静稳性力臂曲线下  $0^\circ$  至  $30^\circ$  处的面积 (m-rad);

$A_2$  — 静稳性力臂曲线下  $30^\circ$  至  $\theta_u$  处的面积 (m-rad);

$\theta_u$  — 进水角和  $40^\circ$  中的较小值;

$GZ_{max}$  — 最大复原力臂 (m);

$\theta_{max}$  — 最大 GZ 值对应的横倾角 ( $^\circ$ );

$G_0M$ —经自由液面修正后的初稳性高度 (m)。

表 3.3 小水线面双体船的完整稳性校验结果

Tab.3.3 Results of SWATH Vessel Stability

校验项目	规范中对多体船稳性的要求	规范要求	实际值	结论
GZ 曲线下的面积	(1) 至横倾角 $30^\circ$ 下的面积应不小于 $0.055m \cdot \text{rad}$ ;	0.055	0.688	满足规范
	(2) 至横倾角 $40^\circ$ 或进水角 $\theta_f$ (如果这个角度小于 $40^\circ$ ) 下的面积应不小于 $0.09m \cdot \text{rad}$ ;	0.09	1.269	
	(3) 在横倾角 $30^\circ$ 与 $0^\circ$ 之间或 $30^\circ$ 与 $\theta_f$ 之间的面积应不小于 $0.03m \cdot \text{rad}$	0.03	0.582	
GZ 值	在横倾角等于或大于 $30^\circ$ 处, 不小于 $0.2m$ ;	0.2	3.711	满足规范
	最大 GZ 值应在横倾角大于 $30^\circ$ 处, 但不小于 $25^\circ$ 处	25	26.81	
$GM_0$ 值	应不小于 $0.15m$	0.15	1.746	满足规范

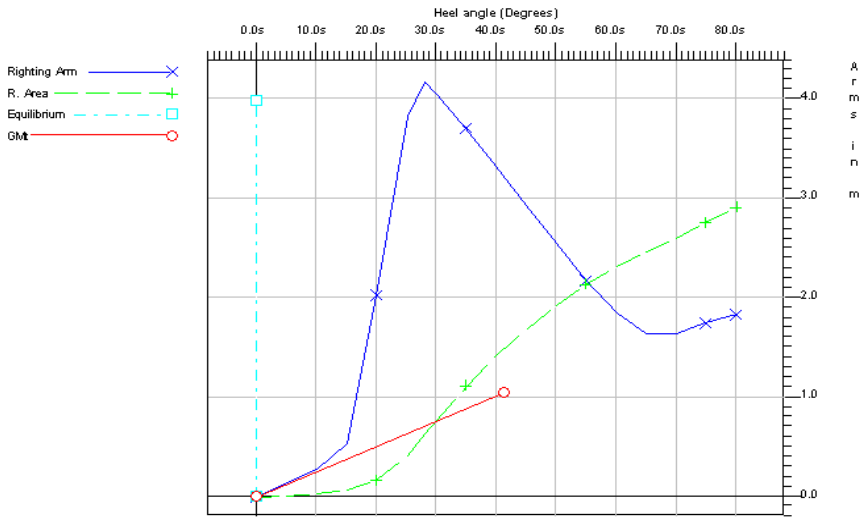


图 3.7 小水线面双体船完整稳性下的复原力臂曲线

Fig.3.7 GZ- $\theta$ Curves of Intact Stability

3.4.2 完整状态下的气象衡准

根据 IMO (Resolution A.562)衡准要求中的气象衡准要求, 静稳性力臂曲线 (如图 3.8 所示) 应符合下列要求:

- a. 由定常风引起的横倾角应小于  $16^\circ$  或甲板边缘进水角的  $80\%$  中较小值;
- b. 图 3.8 中的面积 b 应不小于面积 a。

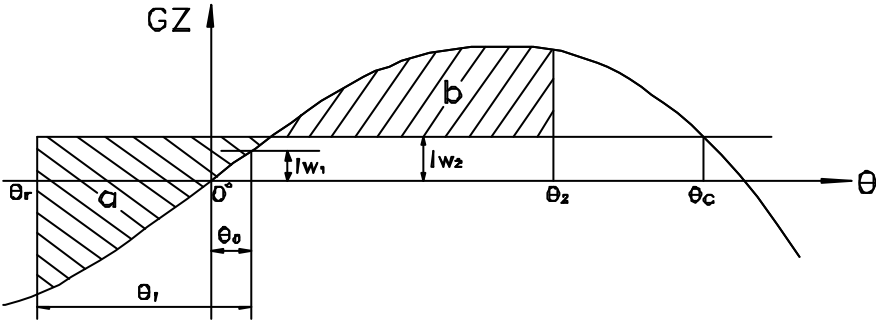


图 3.8 风倾力臂和稳性曲线 (气象衡准要求)

Fig.3.8 Stability and Wind-heeling Moment Lever Curve  
(Stability Requirement in Wind and Waves)

考虑垂直于船舶中心线的一个稳定风压的作用，产生一个稳定风倾力臂  $l_{w1}$ ，

$$l_{w1} \equiv \frac{P \cdot AZ}{1000 \cdot g \Delta} \quad (\text{m})$$

船舶受到一个阵风风压，产生一个阵风倾侧力臂  $l_{w2}$ ，

$$l_{w2} \equiv 1.5 l_{w1} \quad (\text{m})$$

式中：

- P= 504, Pa；有限航区的船舶，经批准，所用的 P 值可以减小；
- A =水线以上船和甲板货的侧投影面积 (m<sup>2</sup>)；
- Z= 从面积 A 的中心到侧面积中心或近似的到吃水一半时的一点的垂直距离 (m)；
- Δ= 排水量 (t)。

图 3.8 中：

- a－由  $l_{w2}$  与  $\theta_r$  确定的面积 (m-rad)；
- b－由  $l_{w2}$  与  $\theta_2$  确定的面积 (m-rad)；
- $\theta_r$ －横摇角 (°)，取  $\theta_r = \theta_0 - \theta_1$ ；
- $\theta_c$ －风倾力臂与静稳性力臂曲线的第二个交点对应的横倾角 (°)；
- $\theta_2$ －取进水角  $\theta_c$  或 50°的较小值；
- $\theta_0$ －定常风引起的横倾角(°)；
- $\theta_1$ －波浪引起的横摇角(°)。

1. 定常风作用下的稳性校验

表 3.4 小水线面双体船的气象衡准校验结果 (a)  
Tab.3.4 Results of SWATH Vessel on Weather Criterion

校验项目	规范中对多体船稳性的要求	规范要求	实际值	结论
横倾角	定常风引起的最大横倾角应小于 16°	16	14.33	满足规范

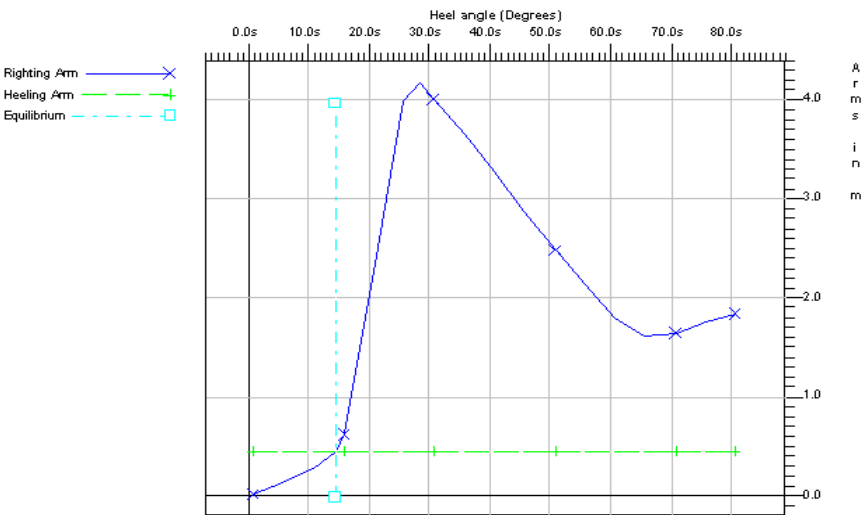


图 3.9 小水线面双体船在气象衡准下的复原力臂曲线 (a)  
Fig.3.9 GZ-ÖCurves on Weather Criterion

2. 由定常风与突风同时作用下的稳性校验

表 3.5 小水线面双体船的气象衡准校验结果 (b)  
Tab.3.5 Results of SWATH Vessel on Weather Criterion



校验项目	规范中对多体船稳性的要求	规范要求	实际值	结论
剩余面积比	图 3.8 中面积比 $b/a$	1	10.388	满足规范

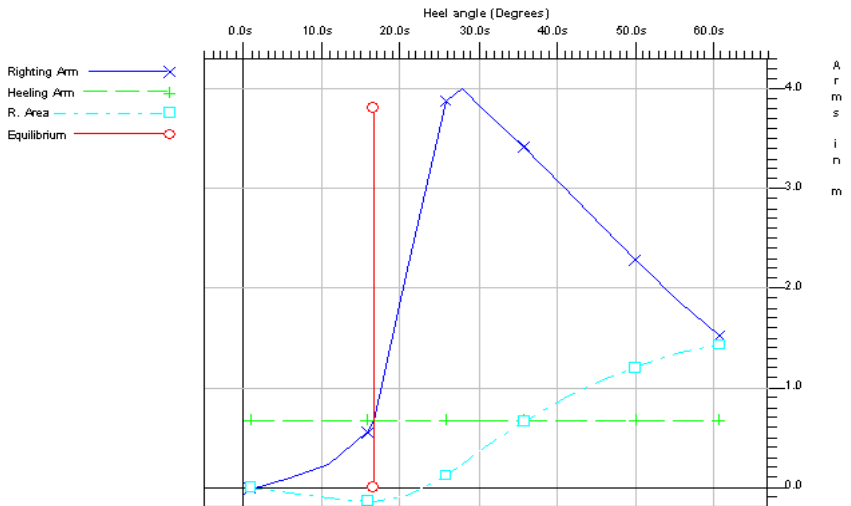


图 3.10 小水线面双体船在气象衡准下的复原力臂曲线 (b)  
Fig.3.10 GZ-ÖCurves on Weather Criterion

3. 由定常风、突风，并且乘客集中于一舷时的稳性校验

表 3.6 小水线面双体船的气象衡准校验结果 (c)  
Tab.3.6 Results of SWATH Vessel on Weather Criterion

校验项目	规范中对多体船稳性的要求	规范要求	实际值	结论
剩余面积	GZ 曲线下的剩余面积 $A_2$	0.0280	0.688	满足规范

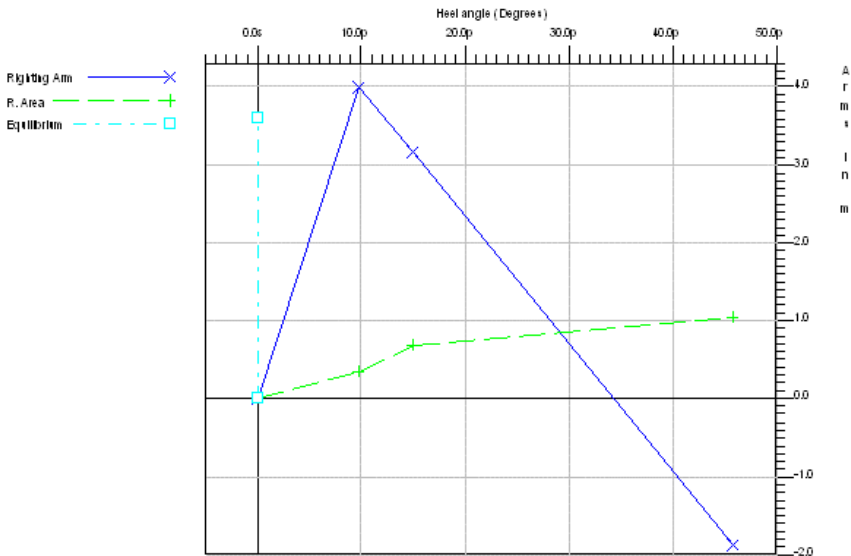


图 3.11 小水线面双体船在气象衡准下的复原力臂曲线 (c)  
Fig.3.11 GZ-ÖCurves on Weather Criterion

3.4.3 破损后剩余稳性

小水面双体船破损后的复原力臂曲线与完整时的复原力臂曲线相似，显然，小水面双体船的破损稳性要优于相当排水量的常规船。破舱稳性方面的巨大潜力是小水面双体船相对于其他船型的显著优势之一。

### 1. 首压载舱破舱时的剩余稳性

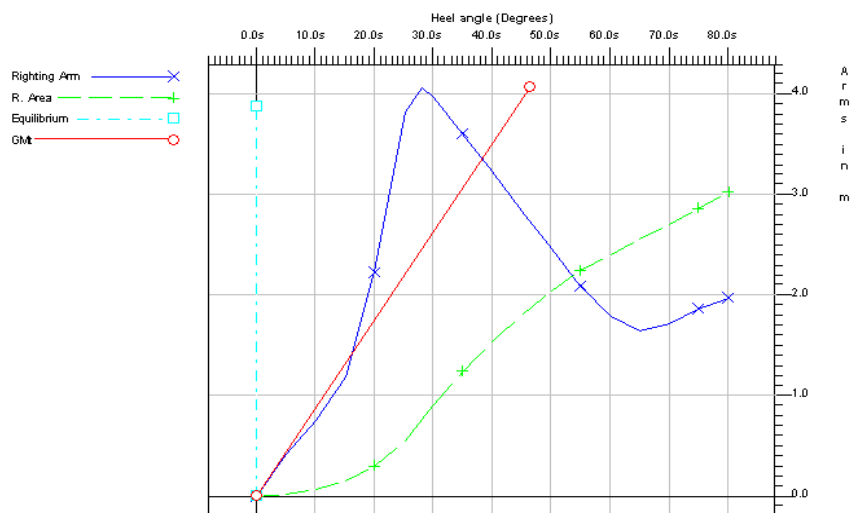


图 3.12 小水面双体船剩余稳性的复原力臂曲线 (a)

Fig.3.12 GZ-ÖCurves on Residual Stability

### 2. 清水舱破舱时的剩余稳性

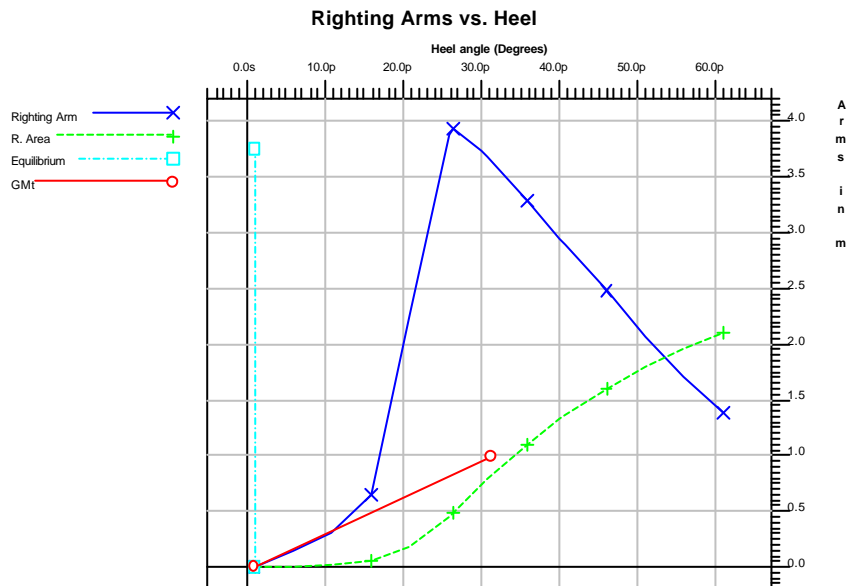


图 3.13 小水面双体船剩余稳性的复原力臂曲线 (b)

Fig.3.13 GZ-ÖCurves on Residual Stability

### 3. 燃油舱破舱时的剩余稳性

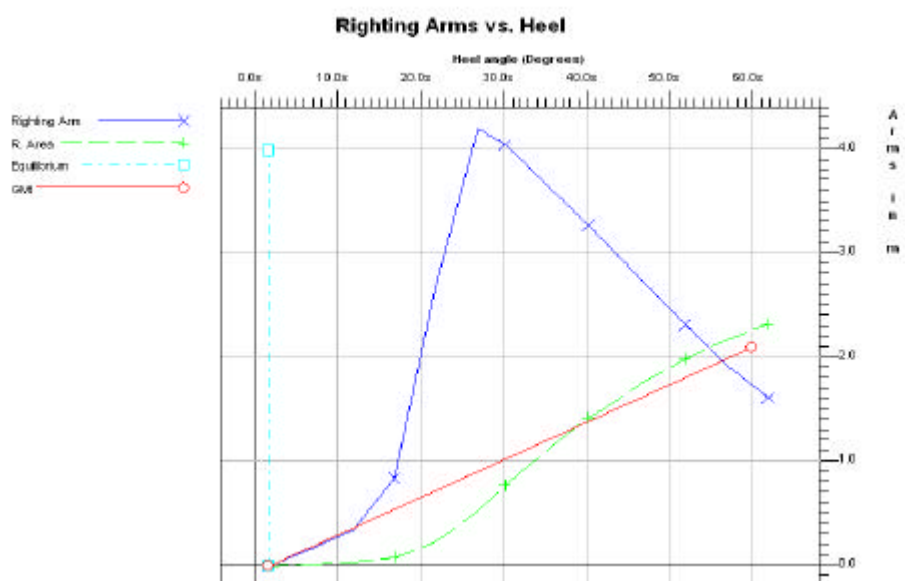


图 3.14 小水线面双体船剩余稳性的复原力臂曲线 (c)

Fig.3.14 GZ- $\ddot{\theta}$ Curves on Residual Stability

#### 4. 尾压载舱破舱时的剩余稳性校核

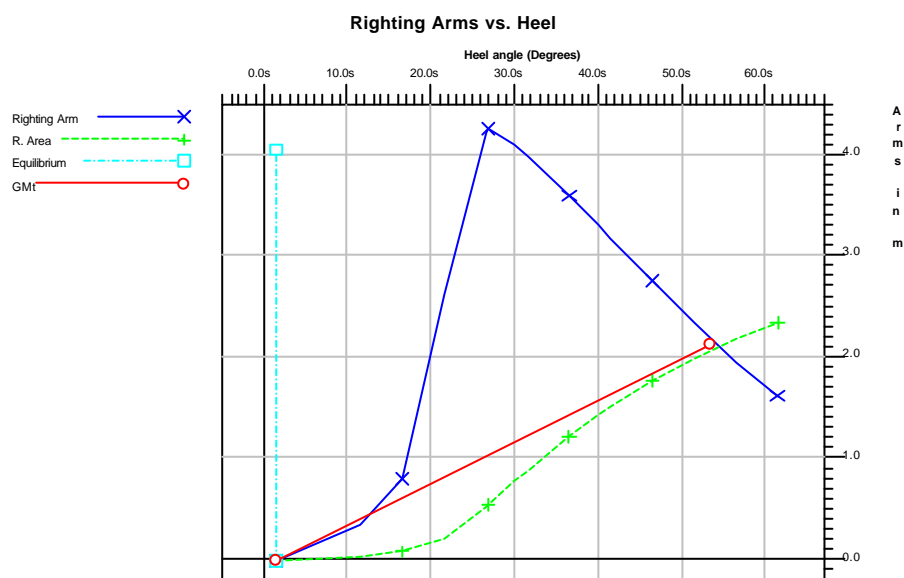


图 3.15 小水线面双体船剩余稳性的复原力臂曲线 (d)

Fig.3.15 GZ- $\ddot{\theta}$ Curves on Residual Stability

### 3.5 本章小结

本章采用静力学方法研究小水线面双体船的完整稳性，从满足稳性要求和避免谐摇两方面阐述了初稳性高的选取原则。采用了 HYDROMAX 模块进行完整状态下的稳性衡准分析，根据国际海事组织的《国际高速船安全规则》、中国船级社的《钢质海船入级与建造规范》和《船舶与海上设施法定检验规则》中适用于所有海船、多体船的稳性要求，进行稳性分析与校核。主要分析过程包括：一般稳性衡准下的完整稳性分析与校核、气象衡准下的完整稳性分析与校核、破舱时的剩余稳性衡准的分析与校核。分析结果是该设计方案具有较好的稳性性能，满足规范要求。

## 第 4 章 分析小水线面双体船的水动力性能， 保证纵向运动稳定性

### 4.1 引言

人们对蒙克（Munk）力矩的认识源于航空业界，早在本世纪 20 年代，一些空气动力学家已经指出，当细长物体以某一小攻角在流体中作前进运动时，将受到一个不利于保持运动稳定的流体动力纵倾力矩的作用。由于该力矩是由早期的空气动力学家 Munk 首先研究分析的，所以该力矩被人们称为 Munk 力矩。

从侧面看，小水线面双体船与常规船没有什么两样，但是从水下看，小水线面双体船似两艘并排飞行的飞艇，是非常典型的细长体。她航行时，必将受到一个水动力纵倾的作用，这个纵倾力矩必然与 Munk 力矩有关。因此，在运动稳定性方面，小水线面双体船有其与常规船相别的特殊之处。Munk 力矩与速度的平方成正比，当航速超过一定值后，这个纵倾力矩将增大到足以超过船的纵向恢复力矩，最终导致纵向稳定性受损，还可能导致航向失稳。

这时，船就不再能够保证正常安全航行，出现典型的失去纵向稳定性现象——埋首。在进行船模阻力试验和运动试验时，如对这个水动力纵倾力矩不采用一些措施予以平衡，若此措施不当，就会使船模因失去纵向稳定性而沉没或倾覆。

保证小水线面双体船纵向运动稳定性直至有效控制船的纵向运动，是小水线面双体船性能设计工作的一项重要目标，必须慎重对待其运动稳定性包括纵向运动和横向运动的稳定性。解决这项工作的关键之一是准确地确定船的水动力纵倾力矩和船的航速和纵倾角之间的关系。

事实上，小水线面双体船在波浪上的运动特性的计算预报方法和单体船在本质上并无区别，都是通过求解运动方程来得到船舶运动幅值的频率响应函数，然后和不规则波能谱结合，预报不同海况下船的各种运动的统计值。从 70 年代初，以切片理论为基础的单体船在波浪中运动性能的计算预报方法已趋于完善，并在使用中取得了相当的成功，在相当程度上已代替了船模的耐波性试验研究工作。因此，本章也以切片理论为基础，考虑小水线面双体船在波浪上的运动特性。

对运输工具来说，即使存在线性失稳状态，也不会希望继续进入非线性振荡状态。因此，本文对小水线面双体船只考虑其线性稳定问题。对于研究线性问题，关于运动的分量和初始状态下的偏移量都很小，其平方值更是高阶小量，可以忽略不计。顾名思义，小水线面双体船的特点在于其水线面面积小，而且运动的变化量又小，所以可以忽略其自由表面的作用，而不会影响最终结果。

### 4.2 小水线面双体船的稳定性问题

#### 4.2.1 静水中的纵向运动稳定性

小水线面双体船在纵向平面内的运动稳定性问题的含义是：船受到一外力干扰之后离开其初始平衡位置后，当这个外力干扰消失之后船能否恢复到初始平衡位置的能力。该问题是小水线面双体船船型性能研究中的一个特点，其本质和讨论方法与航向稳定性问题相类似。

设船首方向为  $x$  轴正向，右舷方向为  $y$  轴正向，向下方向为  $z$  轴正向，如图 4.1 所示。

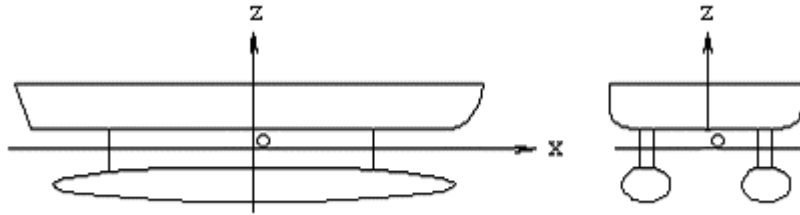


图 4.1 纵向运动坐标系

Fig.4.1 Coordinate of Longitudinal Motion

小水线面双体船的两个片体形状相同，且关于纵中剖面对称布置，所以船的纵向运动和横向运动之间无耦合作用。另外，在小水线面双体船水下部分足够细长的假定下，可以忽略纵荡运动对垂荡和纵摇运动的影响，也可以认为纵荡运动不是重要而可不计。根据参考文献[113]，按以上坐标系，小水线面双体船的纵向运动方程组为：

$$\left. \begin{aligned} m(\ddot{V} - U\dot{q}) &= Z_v \dot{v} + Z_v v + Z_z \dot{z} + Z_q \dot{q} + Z_q q + Z_q \mathbf{q} \\ I_y \ddot{q} &= M_v \dot{v} + M_v v + M_z \dot{z} + M_q \dot{q} + M_q q + M_q \mathbf{q} \end{aligned} \right\} \quad (4-1)$$

式中

- $m$ ——船的质量，
- $V$ ——船的垂向速度分量，
- $Z$ ——法向力，方向向下为正，
- $U$ ——船速，
- $q$ ——绕中心的纵摇角速度，
- $\mathbf{q}$ ——纵倾角，
- $z$ ——垂向位移，
- $I_y$ ——船绕重心纵摇转动惯量，
- $M$ ——绕重心的纵倾力矩。

另，带下标的符号表示该变量对下标变量的偏导数。由于船的垂向速度分量 $V$ 、绕中心的纵摇角速度 $q$ 、垂向位移 $z$ 以及纵倾角 $\mathbf{q}$ 都是摄动小量，所以可以采取如下近似式：

$$\mathbf{a} = \tan^{-1} \frac{V}{U} \approx \frac{V}{U}, \quad h \approx z, \quad \dot{h} \approx V - Uq, \quad q \approx \dot{\mathbf{q}}$$

将以上各式代入 (4-1)，简化后得：

$$\left. \begin{aligned} (m - Z_v) \ddot{h} &= Z_v \dot{h} + Z_z h + (Z_v + Z_q) \dot{\mathbf{q}} + (\dot{U} Z_v + Z_q) \mathbf{q} + U Z_v \mathbf{q} \\ (I_y - M_v) \ddot{\mathbf{q}} &= (\dot{U} M_v + M_q) \dot{\mathbf{q}} + (U M_v + M_q) \mathbf{q} + M_v \ddot{h} + M_v \dot{h} + M_z h \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$$

上式中运动线性偏移量 $h$ 、 $\mathbf{q}$ 的系数为恢复力系数，其倒数 $\ddot{h}$ 、 $\dot{h}$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}$ 及 $\dot{\mathbf{q}}$ 的系数即为水动力系数，它们的大小由下述因素决定：

- 1) 没有设置稳定鳍的裸船体对具有自由水表面的扰动所引起的势流运动；
- 2) 没有设置稳定鳍的裸船体对水扰动引起的粘性运动；
- 3) 稳定鳍的水动力效应。

本章未涉及该小水线面双体船的稳定鳍研究，因此这里讨论的是不带稳定鳍的小水线面双体船的运动稳定性。

## 4.2.2 纵向运动稳定性分析

由于小水线面双体船船型水下潜体细长、支柱瘦长，因此各水动力系数可以应用切片理论，参考文献[36]，求解方程组 (4-2)。

由于方程组 (4-2) 是一个具有常系数的线性齐次微分方程组，应具有如下形式的特征解：

$$\left. \begin{aligned} h(t) &= a_n e^{I_n t} \\ \mathbf{q}(t) &= b_n e^{I_n t} \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

式中

$a_n$ 、 $b_n$ ——系数，

$I_n$ ——特征根，

$t$ ——时间。

将 (4-3) 代入 (4-2)，消去  $e^{I_n t}$ ，得：

$$\left. \begin{aligned} [(m - Z_v) I_n^2 - Z_v I_n - Z_z] a_n + [-(Z_v + Z_q) I_n^2 - (\dot{U} Z_v + Z_q) I_n - U Z_v] b_n &= 0 \\ (M_v I_n^2 + M_v I_n + M_z) a_n + [(M_v - I_y) I_n^2 + (\dot{U} M_v + M_q) I_n + (U M_v + M_q)] b_n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4-4)$$

要使 (4-4) 中  $a_n$ 、 $b_n$  具有非零解，则其系数行列式应为零，即：

$$a I_n^4 + b I_n^3 + c I_n^2 + d I_n + e = 0 \quad (4-5)$$

式中

$$\begin{aligned} a &= (m - Z_v)(M_v - I_y) + M_v(Z_v + Z_q) \\ b &= (m - Z_v)(\dot{U} M_v + M_q) - Z_v(M_v - I_y) + M_v(Z_v + Z_q) + M_v(\dot{U} Z_v + Z_q) \\ c &= (m - Z_v)(\dot{U} M_v + M_q) - Z_v(\dot{U} M_v + M_q) - Z_z(M_v - I_y) + M_z(Z_v + Z_q) + \\ &\quad + M_v(\dot{U} Z_v + Z_q) + U M_v Z_v \\ d &= -Z_v(U M_v + M_q) - Z_z(\dot{U} M_v + M_q) + M_z(\dot{U} Z_v + Z_q) + U M_v Z_v \\ e &= -Z_z(U M_v + M_q) + U M_v Z_v \end{aligned}$$

(4-5) 是 (4-4) 的特征方程， $I_n$  为该特征方程的四个根，可能是实根，也可能是成对的共轭复根。正是这四个根的形式决定了船在静水中的纵向运动的特征，以及纵向稳定性。

- 1) 当  $I_n$  是正实数时，船的纵向运动不稳定；
- 2) 当  $I_n$  是复数且其实部为正，船的纵向运动也是不稳定的；
- 3) 当  $I_n$  是负实数时，船的纵向运动是稳定的，船受到扰动后将作振荡运动而回复到初始平衡位置；
- 4) 当  $I_n$  是复数且其实部为负，船的纵向运动是稳定的，船受到扰动后将以振荡运动

的形式回复到初始平衡位置。

不设置鳍的小水线面双体船大多属于第一、二种情况，其纵向运动一般是不稳定的，这就意味着当引起纵倾产生的外部干扰力矩消失之后，船将不能回到最初的平衡位置，而且纵倾角将随时间不断增大，最后将使船失去正常航行的能力。因此，为了确保小水线面双体船的纵向运动的稳定性，必须采用一些措施来解决这个问题。至今为止，采用稳定鳍是做好的办法。由于本文未作设置稳定鳍的研究，这里不作讨论。

### 4.3 本章小结

本章对本文所设计的小水线面双体船进行稳定性分析，尤其是其纵向稳定性。小水线面双体船这种新高速船型，对于引起垂荡和纵倾的外部干扰力的抵抗力较弱，当航速增大到一定值之后，就必须研究她的纵向稳定性。

本章研究小水线面双体船的纵向运动方程组，分析其纵向运动的稳定条件。但小水线面双体船的纵向运动一般是不稳定的，一般采用安装稳定鳍来解决这个问题，但本文并未对鳍的参数进行研究，因此，并未予以讨论。

## 第 5 章 小水线面双体船的结构初步设计

### 5.1 引言

单支柱小水线面双体船是 20 世纪后期发展起来的新船型,其波浪中优良的运动特性、宽阔的甲板面积等一些优点,是靠她特殊的几何特征来实现的。比如,狭长且规则的水下片体、较大的片体间距和较大的吃水和干舷等等。但是,这些小水线面双体船引以为豪的外形特征又对船舶的重量及重心极其敏感,也对船体结构和强度提出了一些不同于常规单体船的特有的要求。因此,对于小水线面双体船的设计者来说,如何合理而恰当地处理这些结构强度设计方面的问题就是船体结构设计工作的最终目标,同时也是最大难题。近几年来,世界各国的船舶设计者陆续研究和开发了无论在数量和性能上都可观的小水线面双体船,其中大部分已经建造完工并投入营运,在地球的蓝色版图上履行着她们的使命。

一般来说,采用两类方法来进行高速船的结构设计:规范设计方法和直接计算方法。各船级社入级与建造规范的制定是建立在以往船舶建造和营运不断积累经验和修订的基础上的,被认为是“渐进性的”(Evolutionary)。但是,近年来各种新型高速船层出不穷且发展极快,被认为是“革命性的”(Revolutionary)。由于缺乏足够的经验数据及资料,因此只能按照一些基本原理(Basic Principles)或基本方法(Basic Methods),采用直接计算方法(Direct Calculation Method)而后沿用中国船级社规范所规定的安全系数对各结构构件进行安全性校核。

如图 5.1 所示,是利用直接计算方法对高速船进行结构分析的流程图。

本章主要开展以下工作:

参照国内外一些小水线面双体船船型的中横剖面结构图资料,并结合前面几章概念设计的结果,对本文小水线面双体船进行结构初步设计,勾勒出典型横剖面结构型式;

小水线面双体船的船体结构采用混合骨架式,潜体为纵骨架式,连接桥为横骨架式。

### 5.2 小水线面双体船的结构初步设计

船体结构设计应保证其在外载荷作用下的强度。因此,准确地计算作用于船体上的各项载荷是进行结构设计和强度校核的前提。由于小水线面双体船船型特殊,在结构初步设计阶段,将会面临以下几个问题:

(1) 选取合适的骨架形式。这必须考虑到该船在航行过程中的受力状态,将小水线面双体船的受力状态与常规单体船相比,分析其差异。

(2) 小水线面双体船型的应力集中问题十分突出。尤其是横舱壁、横向强框架及船体外板结构在支柱上、下端及连接桥根部的相邻区域出现局部高应力,特别是横浪工况。该船在上述部位作了较多的局部加强,甚至采用高强度钢。

(3) 由于小水线面双体船的主机置于空间远远小于常规单体船机舱的潜体之中,必须考虑到以后吊缸、大规模修理等实际问题,因此,潜体的结构设计在满足强度、刚度要求的前提下,必须考虑到便于维修。

(4) 关于控制船舶结构重量的问题。由于该船是单艘生产,如果一味考虑重量问题,而忽略生产上的可行性,也是不可取的。



---

小水线面双体船的船体结构不同于常规船型，为了能使旅客行走畅通，主甲板

---

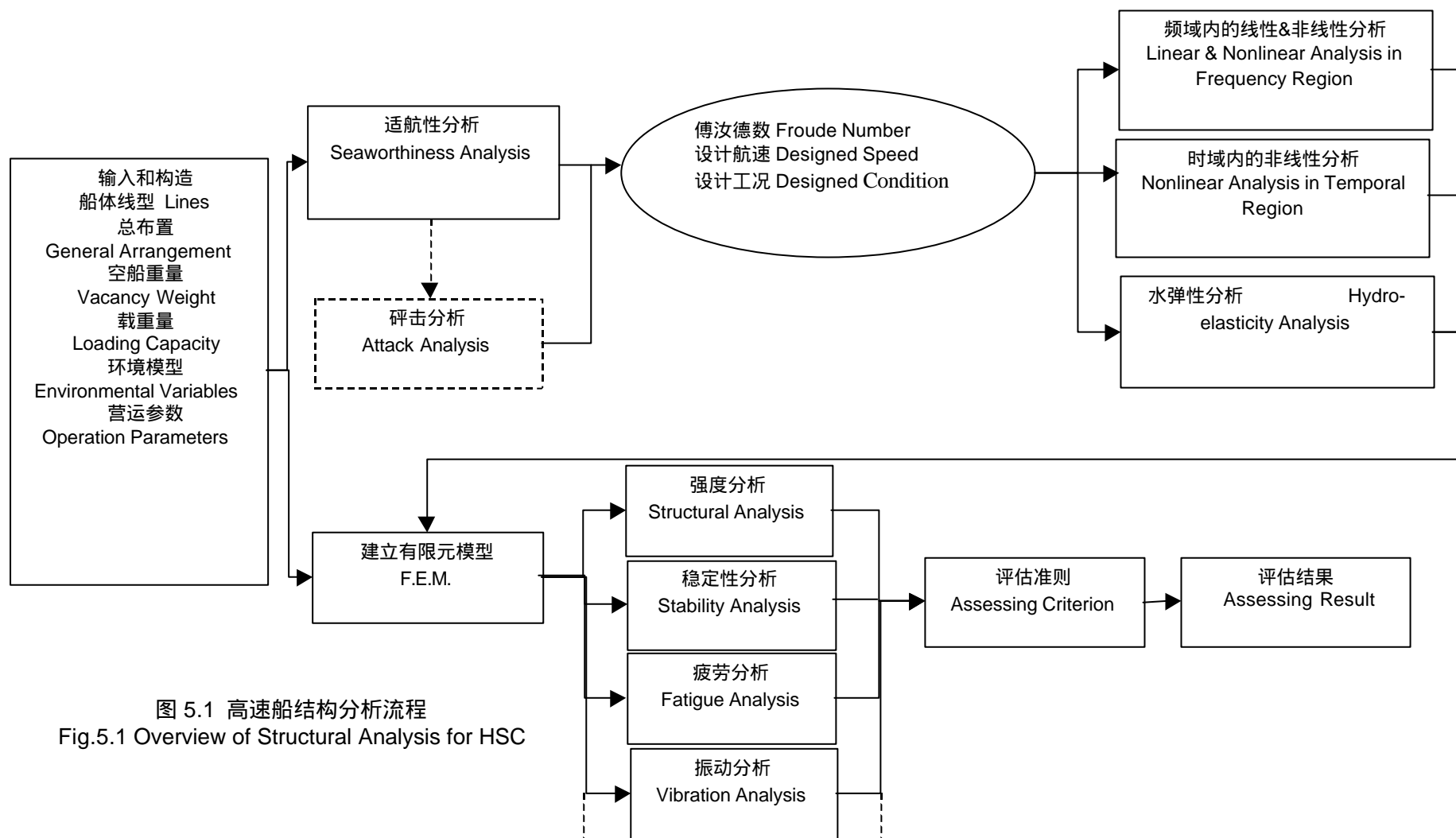


图 5.1 高速船结构分析流程  
Fig.5.1 Overview of Structural Analysis for HSC

般贯通整个船长，并且尽量少设置横舱壁，因为横舱壁上开有较大门孔，致使横舱壁的强度大大减弱，使船体容易发生扭曲变形，甲板强横梁和甲板纵桁的构件尺寸常受到货舱净高、宽度及许用变形等因素的限制，为减少强横梁和纵桁的跨距，通常在货舱内设置一二排支柱，承受来自各层甲板的集中载荷。需要进一步指出的是，小水线面双体船的船体结构上可能出现应力集中现象的部位是支柱与连接桥和支柱与主体的连接处。所以，要对这些部位的结构设计给予特别的注意。



图 5.2 连接桥底部因过载出现的下陷  
Fig.5.2 the Collapse of Cross-Deck due to Overloading



图 5.3 肋骨处出现的裂纹  
Fig.5.3 the Cracks in Frame Web

尽管小水线面双体船船型有其特殊的外形特征，与常规船相比，她们也有相似之处。比如，和其他普通船只一样，她是航行在水和空气这两种介质之中，船体结构同样承受水压力；她的受力状况与双体船有相似之处；小水线面双体船的水上船体即主体可以看作是由单体船和连接桥构成。所以，在一定程度上，小水线面双体船的两个单船体与常规单体船有相似之处。对于上述几点，可以在一般的船舶设计规范和指南中找到明确的规则。在设计过程中，参阅了 CCS《钢质海船入级与建造规范(2001)》、CCS《海上高速船入级与建造规范(1996)》、CCS《小水线面双体船设计与建造指南(2004)》、CCS《非高速小水线面双体船建造指南(2005)》(评审稿)。

### 5.2.1 结构型式的确定



图 5.4 A&R 公司为德国近岸水域开发的小水线面双体引水船建造现场照片  
Fig.5.4 Photo of hull of SWATH Pilot



图 5.5 小水线面双体船分段建造现场照片  
Fig.5.5 Photo of partial hull of a SWATH designed by A&R Co. in German inshore

本章参照国内外一些小水线面双体船的典型横剖面结构图资料，并结合前几章概念设计结果，对本文小水线面双体船进行了结构初步设计，确定出典型横剖面结构形式(见图 5.5)。

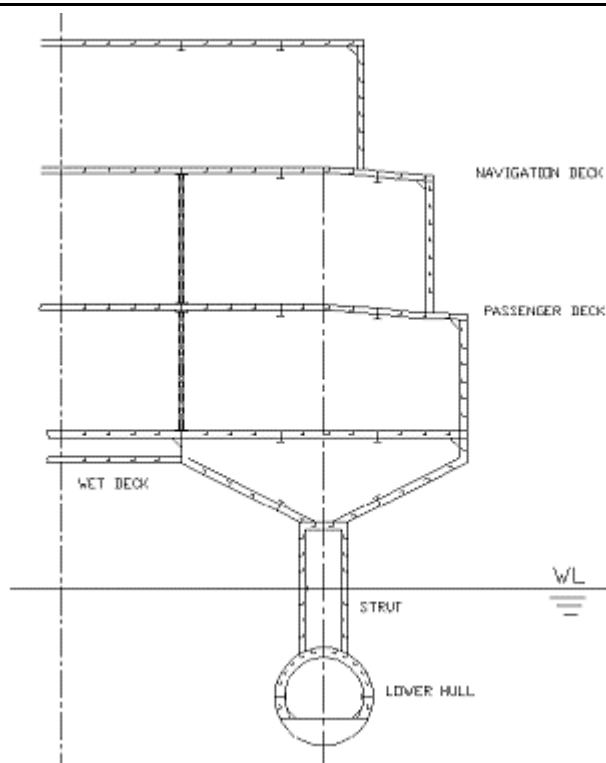


图 5.6 小水线面双体船的典型横剖面结构图

Fig.5.6 Cross section structure of SWATH Vessel

本设计方案具有如下特点：

- (1) 本船为单支柱小水线面双体船船型；  
双机、双桨、双舵的尾机型船；  
水下潜体、支柱结构系钢质，连接桥、上层建筑为铝合金。
- (2) 主船体船底和舷侧、左右下潜体、上甲板均采用纵骨架式结构形式，湿甲板（连接桥区域）采用横骨架式结构形式。
- (3) 舷侧强肋骨间距和甲板强横梁间距均为三个肋位；下潜体舷侧设置舷侧纵桁，以减小舷侧强肋骨的跨距；湿甲板、主甲板、上甲板设置若干甲板纵桁，以减小甲板强横梁的跨距；车辆甲板和乘客甲板#9、#11 沿纵向设置两排垂直支柱，距中线 2464mm，以承受来自各层甲板的集中载荷，并可减小强横梁和纵桁的跨距。
- (4) 下潜体作为船舱。船舱中自艏至艉依次为清水舱（#2 $\frac{1}{2}$ ~#3 $\frac{1}{2}$ ）、空调机舱（#2 $\frac{1}{2}$ ~#6）、货舱（#6~#8）、发电机舱（#8~#11 $\frac{1}{2}$ ）、燃油舱（#11 $\frac{1}{2}$ ~#13）和主机舱（#11 $\frac{1}{2}$ ~#16）。另外，为了保证调整全船的纵倾并改善稳性性能，在主船体的首尾加设压载舱，即首压载舱（#0~#2 $\frac{1}{2}$ ）、尾压载舱（#16~#18）。

主船体在#2 $\frac{1}{2}$ 、#6、#8、#12、#16 $\frac{1}{2}$ 设置 5 道水密舱壁。

- (5) 连接桥区域桥内的横舱壁（开有减轻孔）设置在与支柱、左右潜体的横舱壁相同肋位处，以提高船体承受横向载荷的能力。

- (6) 对于潜体部分，分为机舱和非机舱两个部分考虑。对于非机舱部分，考虑坐墩要求，合理设置了数道龙骨，并与机舱内的基座有效连接或过渡。此外，潜体舷侧设有

舷侧纵桁，以求缩短构件跨距，减小重量。在潜体与支柱体相交处，采用合理的结构形式给予加强。机舱部位较为特殊，轮机方面需要尽可能大的空间，结构方面需要考虑坐墩、重量、刚度、强度等问题。在满足结构要求的同时，一并满足了主机不出舱能进行一般维修的要求。

### 5.2.2 结构材料选取

本文小水线面双体船的水下潜体、支柱结构为钢结构，均采用 A36 高强度钢作为建造材料，屈服极限为 355MPa。部分材料参数为：弹性模量  $E=2.1e+5\text{MPa}$ ，泊松比  $\nu=0.3$ 。连接桥区域、上层建筑均采用铝合金作为建造材料。

## 5.3 本章小结

本章对本文所设计的小水线面双体船进行了结构初步设计，对于小水线面双体船这种新高速船型，结构初步设计应当充分借鉴国内外相关船型的设计经验，不妨先暂且按照规范选取构件尺寸，再通过详细有限元分析考察结构设计的合理性并提出改进优化意见，但本章并未对其展开有限元分析，因此在后续工作中，尚有很大空间可以研究。

## 第6章 总结

### 6.1 小水线面双体船在我国应用的前景展望

我国是一个沿海国家,具有丰富的海洋资源,漫长的海岸线,探索小水线面双体船在我国的发展和应用前景,有着十分重要的意义。

小水线面双体船船型有别于常规排水型船及其它高性能船的特点,特别是它在汹涛中稳定的平台性能(航行和静泊),宽敞的甲板面积等,为我国高速水运和海军提供了广阔的应用前景。

我国大部分近海海域,由于地理条件的影响,较大的风浪,极大地影响了沿海航区常规船型的渡船正常营运。旅游业在沿海城市的蓬勃发展,使人们对交通运输的要求也更高,对交通工具的安全性、快速性、舒适性追求是人们的迫切愿望。

若以小水线面双体船作为沿海渡船,将可以保持在较大的风浪中快速安全航行。而且,小水线面双体船型排水量小,载客密度高,使其营运效率大为提高,可以大大缓解沿海交通运输的多种矛盾。

小水线面双体船是一种航海性能及其优良的渡船,不仅耐波性能优于常规渡船,宽阔的甲板面积和舱室容积,使其在载客、载货方面还优于其它高性能船舶。因此,从营运经济性来看,小水线面双体船是有极大发展前途的。

### 6.2 工作总结及亟需深入研究的方向

本文结合国内外小水线面双体船的研发和设计经验,提出一种小水线面双体船的设计方案,并对这种船型的方案设计、性能计算(完整稳性和运动稳定性)、结构设计进行分析和探讨,得出一些有意义的结论,希望对该船型后续的深入研究、开发和应用能有一点参考价值。

现将本文各章节完成的主要工作和得出的主要结论总结如下:

#### 6.2.1 方案设计

##### 1) 主要工作内容

通过分析国内外发表的小水线面双体船船型的方案设计资料,完成了一艘小水线面双体船的方案设计,并对此船型的设计方法进行了探讨。依次开展了主体尺度要素确定、主体和潜体型线设计及光顺、潜体尺度布局要素确定、总布置设计、重量重心估算等工作,为后续对小水线面双体船设计方案的性能和结构研究提供一个明确的研究对象。

##### 2) 主要结论

- ① 方案设计应分为主尺度和船型系数要素确定和潜体尺度布局要素确定两个阶段。前者主要从快速性和经济性角度出发,可以航速和空船重量作为评价指标进行多方案优选;后者主要从满足稳性和甲板布置要求等方面来考虑。
- ② 本文在主体尺度和船型系数要素优选中,针对小水线面双体船这种船型的特点,在对其阻力性能影响最大的一些因素中经仔细斟酌分析后选取潜体长度  $L_B$  与直径  $D$  之比  $L/D$ 、棱形系数  $C_{PB}$  作为设计变量,获得较好的优选结果。
- ③ 在主体尺度和船型系数要素确定、潜体线型选择、型线设计阶段,应充分借鉴现有的设计方法、数据和资料。

### 3) 工作中不足之处和亟需深入研究的方向

- ① 确定潜体布局要素时, 尚未考虑耐波性和操纵性因素。在开展潜体布局设计时, 如何综合考虑稳性、兴波干扰、耐波性(横摇)、操纵性(回转性能)、总布置、结构强度等方面的因素, 以获取满足设计要求且较为理想的折衷方案, 是一项极其复杂的工作。
- ② 方案设计阶段对推进方式和推进器的数量、尺度、布置等未作详细探讨, 这也是 SWATH 船的研究和设计中值得重点关注的一个方面。

## 6.2.2 稳性性能研究

### 1) 主要工作内容

采用静力学方法研究小水线面双体船的完整稳性, 从满足稳性要求和避免横摇两方面阐述了初稳性高的选取原则。根据规范中适用于所有海船、多体船的稳性要求, 进行稳性分析与校核。

### 2) 主要结论

小水线面双体船初稳性高  $GM$  的计算方法类似于单体船, 在选取  $GM$  时也应应在稳性和横摇两者之间进行折衷。小水线面双体船的  $GM$  值一般远小于双体船, 它的横摇性能更接近于单体船, 从而克服了双体船航行时出现令人不适的摇摆现象。

小水线面双体船的静稳性臂随横倾角的变化趋势复杂而灵活, 左右两个潜体的布局参数以及潜体的尺度、船型都对静稳性臂的大小有直接影响, 这使得设计者可以通过精心设计以尽量使小水线面双体船产生变化平缓的静稳性曲线, 以减少横摇运动发生的概率。

增大两潜体横向跨距  $b$  能够显著增大复原力臂, 潜体吃水  $d$  的增加对于改进大倾角稳性也有一定帮助。

工作中不足之处和亟需深入研究的方小水线面双体船复原力臂的影响本文未作探讨。

小水线面双体船破损后的复原力臂曲线与完整时的复原力臂曲线相似, 显然, 小水线面双体船的破损稳性要优于相当排水量的常规船。破舱稳性方面的巨大潜力是小水线面双体船相对于其他船型的显著优势之一。确定潜体尺度和布局要素时, 破舱稳性是必须考虑的重要因素。左右潜体的长度、分舱、压载水的设置均对破舱稳性有直接影响, 将来必须建立量化指标, 从而为小水线面双体船的设计(尤其是潜体设计)提供依据。

针对小水线面双体船这种新高速船型应当建立一套适宜的稳性校核标准。迄今为止, 各设计单位大多采用 IMO《国际高速船安全小水线面双体船稳性特性的变量比常规单体船、双体船多很多, 因此建立一套小水线面双体船的稳性评估准则是一项异常复杂的工作。

## 6.2.3 纵向运动稳定性分析

### 1) 主要工作内容

本章对本文所设计的小水线面双体船进行稳定性分析, 尤其是其纵向稳定性。小水线面双体船这种新高速船型, 对于引起垂荡和纵倾的外部干扰力的抵抗力较弱, 当航速增大到一定值之后, 就必须研究她的纵向稳定性。

### 2) 主要结论

本章研究小水线面双体船的纵向运动方程组, 分析其纵向运动的稳定条件。但小水线面双体船的纵向运动一般是不稳定的, 一般采用安装稳定鳍来解决这个问题。

### 3) 工作中不足之处和亟需深入研究的方向

本文并未对鳍的参数进行研究,这一点对于保证小水线面双体船纵向运动稳定性而言是至关重要的。

#### 6.2.4 结构初步设计

##### 1) 主要工作内容

借鉴国内外小水线面双体船公布的设计资料和数据,绘制出本文小水线面双体船的典型横剖面结构图,并采用CCS相关规范初步定出各构件型式。

##### 2) 主要结论

对于小水线面双体船这种船型,其结构初步设计应当充分借鉴相关船型(常规双体船、潜水艇)的设计经验。

横舱壁是小水线面双体船的主要承载结构,增大其板厚可以有效减轻潜体舷侧、支柱舷侧以及横舱壁连接处的应力集中程度。

主体船底外板应力值非常高,由于小水线面双体船的结构型式特殊,如果初步结构布置设计不够合理,则总载荷可能会通过不寻常的途径分布,从而导致高负载的船底和低效率的上甲板。采用纵舱壁连接,可以使得小水线面双体船中部的垂向载荷传递方式更逼近单体船,从而有效降低湿甲板和主体连接处的应力集中程度。

##### 3) 工作中不足之处和亟需深入研究的方向

① 基于CCS相关规范所确定的结构构件型式显然是显粗糙的,随着高速艇新船型研发和实船建造步伐的逐步推进,将来的小水线面双体船结构设计会有更多的经验可供借鉴。

② 多体船外载荷的研究是一项具有挑战性的课题,小水线面双体船也不例外。应对其开展详尽的有限元分析之前,结构的短期和长期响应理应明确确定,但本文未作深入研究,这一点对于小水线面双体船船体结构设计和分析而言是至关重要的。

## 6.3 工作心得体会

小水线面双体船船型独特,性能优越,在商船、军船领域均有广阔的应用前景。由于其概念的新颖性和相关参考资料的匮乏,致使该船型的研究异常复杂,本论文工作的开展也可谓步履维艰。自着手接触该课题至完成论文的一年半期间内, *Naval Architects*、*NEJ* (*Naval Engineers Journal*) 等英文期刊关于国外小水线面双体船(SWATH)研发和建造最新动态的报道多次出现,这使得笔者一方面倍受鼓舞,另一方面也深切地感受到中国在船型创新性研究方面与国外仍存在显著差距。

在筹备论文工作中笔者深刻地体会到新船型开发和设计是一项极其复杂的系统工程,涉及的知识领域非常广,小水线面双体船作为一种复杂船型,其开发更是如此。对该船型的研究一方面应当充分援引、借鉴以往的工作成果,避免重复劳动;另一方面建议组建开发小组,集思广益,发扬团队协作精神,以提高工作效率,缩短研发周期。

笔者限于水平,囿于积习,仅就小水线面双体船的方案设计方面作了尝试性的初步研究,完成的工作十分有限。有关小水线面双体船性能等一些深层次的核心研究领域笔者尚未涉足(如破舱稳性、耐波性、水动力外载荷、结构设计优化等课题),欲使小水线面双体船船型成为一种在航运市场和军事领域具有较强竞争力的实用船型可谓任重道远。



---

---

## 参考文献

- [1] 现代海军武器装备手册记录细览, 中国船舶重工集团公司第七一四研究所, 2000
- [2] 李百齐, 水翼船和小水线面双体船技术进展, 上海造船, 1996 (2)
- [3] 柳卫东, 裘泳铭, 顾敏童, 单体小水线面水翼复合型高速船翼航状态稳性研究, 船舶工程, 1999, (5)
- [4] Nigel Gee, Edward Dudson, Anthony Marchant and etc. The Pentamaran A New Hull Concept for Fast Freight and Car Ferry Applications, 13th Fast Ferry International
- [5] 卢晨, 小水线面中体五体车客渡船概念设计及全船结构有限元分析, 上海交通大学硕士学位论文, 2005
- [6] 吕松岭, 中国沿海高速船运输展望, 交通与运输, 1999, (4)
- [7] 李百齐, 21 世纪海洋高性能船, 北京: 国防工业出版社, 2001
- [8] 恽良, 邬成杰, 面向 21 世纪的高性能船舶, 武汉造船, 1997, (3)
- [9] 恽良, 面向 21 世纪世界海上快速运载工具的发展前景, 船舶工程, 1994, (4)
- [10] Dubrovskiy, V.A., Attractive Potential of Multi-Hulls, Oceanographic Literature Review, January, 1998, 45 (1)
- [11] The Shape of Things to Come, High Speed/High Performance Ship and Craft Symposium-Summer 2005, Wahington, USA
- [12] 崔承根, 多体船—未来高速新船型, 华中理工大学学报, 1998
- [13] 李志克, 新概念舰船逐鹿海战场, 解放军报, 2002.6
- [14] Toby Ratcliffe, SWATH Golf Club Hull Flow Studies, Marine Technology and SNAME News, New York: Apr. 1997, 34 (2)
- [15] Victor A Dubrovskiy, A Concept of the Triple-Hull Frigate, Marine Technology and SNAME News, New York: Summer 2000, 37 (3)
- [16] 张煦, 新颖独特的小水线面双体船, 现代军事, 1997, (9)
- [17] Dinsmore, R. P., Swath Ships: Their Numbers Grow, Oceanographic Literature Review, October 1995, 42 (10)
- [18] 晏燕, 全海候不晕船“新世纪一号”首航, 科技日报, 2004.5
- [19] 郑明, 朱军, 小水线面双体船—高技术船舶的方向, 中国海洋报, 2000.9
- [20] 郑明, 走进小水线面双体船, 中国船舶报, 2000.11
- [21] 邹早建, 罗青山, 徐海祥等, SWATH 船型及其阻力性能计算, 武汉理工大学学报, 2002, 26 (3)
- [22] 李若虹译, 华煜群校, 引人注目的多体船潜力, 国外舰船工程, 1998, (230)
- [23] 许统铨, 多体船技术开发, 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 2000, 23 (2)
- [24] 刘淮, 国外多体舰艇发展现状, 船舶工业技术经济信息, 2004, (2)
- [25] 张朝阳, 我国建成第一艘小水线面双体船, 经济日报, 2001.4
- [26] 本刊编辑部, 我国研究设计开发小水线面双体船的简要回顾与启示, 船舶工业技术经济信息, 2001, (12)
- [27] 吕永盛译, 军力校, 多体船的去、现在和未来, 国外舰船工程, 1997, (4)
- [28] 于明澜, 王肇庚, 王晓宁等, 小水线面双体船在我国应用前景浅析, 武汉造船, 1997, (6)
- [29] 葛纬桢, 石理国, 小水线面船开发与应用, 中国船舶科学研究中心
- [30] 谢家骥, 南海海域渔政执法公务船舶采用小水线面双体船型的探讨, 船舶工业技术经济信息, 2000, (10)
- [31] Nigel Gee, “The Economically Fast Freighter”, Fast Freight Transportation by Sea RINA 1999
- [32] 杨国光, 军用小水线面双体船初探, 船舶工业技术经济信息, 2000, (14)
- [33] 杨松林, 杨大明, 小水线面双体船的性能优势及其应用概况, 造船技术, 2000, (3)
- [34] 上海交通大学, 上海造船工业局《造船史话》编写组编, 造船史话, 上海: 上海科学技术出版社, 1979
- [35] 吉田文二, 王宪珍译, 舰船知识, 海洋出版社, 1985

- 
- [36] 黄鼎良, 小水线面双体船性能原理, 北京: 国防工业出版社, 1993
  - [37] 刘红, 张顺方, 小水线面双体船性能初探, 上海海运学院学报, 2000, 21 (2)
  - [38] 中国船舶工业综合技术经济研究院, 小水线面双体船简要发展史, 小水线面船专辑, 1998
  - [39] 张鑫, 郑明, 美国军民结合致力开发小水线面双体船, 船舶工业技术经济信息, 1999, (174)
  - [40] 郑明, 程福元, 加速开发和应用小水线面双体船, 中国船检, 2000, (5)
  - [41] 郑明, 何正曼, 从小水线面双体船的统计中分析性能规律和设计概念, 船舶, 2001, (4)
  - [42] 郑明, 张鑫, 世界各国发展小水线面双体船概况与分析一经历“百花齐放”, 走向市场、战场, 船舶工业技术经济信息, 1999, (8)
  - [43] 葛纬桢, 钱家玉, 我国小水线面双体船的研究设计进展与应用建议, 船舶工业技术经济信息, 1999, (10)
  - [44] 谢家骥, 郑明, 李佳才, 我国第一艘小水线面双体船设计与建造简介, 广东造船, 2001, (4)
  - [45] 张远平, 林祝明, 高性能船又添新家族—我国首艘小水线面双体船下水, 船舶工业技术经济信息, 2000, (11)
  - [46] An Unusual Application of Multi-hull Ship, Ship and Ferry International, July/August 2003
  - [47] Michael E Dockter, Kurt Schmidt, SWATH Research Vessel: The Building of RV Western Flyer, Marine Technology and SNAME News, New York: Jul 1996, 33 (3)
  - [48] 郑明, 两型最新的小水线面双体船, 船舶工业技术经济信息, 1999, (8)
  - [49] 李佳才, 何正曼, 小水线面双体海事巡逻船设计, 广东造船, 2004, (4)
  - [50] 许森, 王绍明, 美国“胜利”号水声监听船(T-AGOS 19)一海军第一艘大型小水线面双体船海上试验情况, 船舶工业技术经济信息, 1999, (10)
  - [51] 刘亚东, 双体小水线面水翼复合型高速船(HYSWATH)船型研究, 上海交通大学博士后研究工作报告, 2005
  - [52] 金亨哲, 刘亚东, 谭家华, 水翼复合小水线面双体船阻力性能和翼航姿态计算, 华东船舶工业学院学报, 2005, 19 (3)
  - [53] A.Papanikolaou, P.Kaklis, C.Koskinas and etc., Hydrodynamic Optimization of Fast-Displacement Catamarans, Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics(1997), Commission on Physical Science, Mathematics, and Applications
  - [54] Papanikolaou, A., Nowacki, H., Concept Design and Optimization of a SWATH Passenger/Car Ferry, Proc. IMAS-89 Int. Conf. on Applications of new Technology in Shipping, Athens, 1989
  - [55] Papanikolaou, A., Computer-Aided Preliminary Design of a High-Speed SWATH Passenger Car Ferry, Proc. 4th IMSDC'91 Int. Conf., Kobe, 1991
  - [56] Papanikolaou, A., Zaraphonitis, G., Androulakis, M., Preliminary Design of a High-Speed SWATH Passenger Car Ferry, Journal Marine Technology, 1991, (28)
  - [57] Moan, T. Towards Structural Design of High-Speed by Direct Calculation, Keynote lecture, FAST 2003
  - [58] Guidance Notes on “Dynamic Load and Approach” and Direct Analysis for High Speed Craft, American Bureau of Shipping, February 2003
  - [59] 杨松林, 杨大明, 小水线面双体船的性能优势及其应用概况, 造船技术, 2000, (3)
  - [60] A. Papanikolaou, E. Eliopoulou, The European Passenger Car Ferry Fleet—Review of Design Features And Stability Characteristics of Pre-and Post SOLAS 90 Ro-Ro Passenger Ships, Euroconference on Passenger Ship Design, Construction, Safety and Operation, Anissaras-Crete, October 2001
  - [61] Juan Antonio Moret, Nigel Gee, The IZAR High Deadweight, Fast Ro-Pax Ship an Economic Solution to the Carriage of Heavy Trucks and Cars at 40 Knts
  - [62] M.R. Davis, D.S. Holloway, The influence of hull form on the motions of high speed vessels in head seas, Ocean Engineering, 2003, (30)
  - [63] 陈操红, 林焰, 纪卓尚等, 小水线面双体船型线设计方法研究, 中国造船, 2005, (2)
  - [64] 刘志华, 董文才, 熊鹰, 小型高速 SWATH 船下体型线研究, 船舶工程, 2004, 26 (6)
  - [65] 周永峰, 船界“新宠”小水线面双体船, 中国水运报, 2003.1
  - [66] 葛纬桢, 不管风吹浪打胜似闲庭信步—泰然海上的小水线面双体船, 航海, 2000, (3)

- 
- [67] 李培勇, 裘泳铭, 顾敏童, 高速三体船型概念设计研究, 上海交通大学学报, 2004, (11)
- [68] 李培勇, 多体船型的性能及概念设计研究, 上海交通大学博士学位论文, 2002
- [69] 朱兰, 环渤海湾车客滚装船船型方案论证研究, 大连理工大学硕士学位论文, 2002
- [70] Yeh, H.Y.H. Series 64 Resistance Experiments on High-Speed Displacement Forms' SNAME, Marine technology, 1965, (7)
- [71] V.I. Beena, V. Anantha Subramanian, Parametric studies on seaworthiness of SWATH ships, Ocean Engineering, 2003, (30)
- [72] Design Gallery, SWATH International Ltd.
- [73] 中国船舶工业总公司, 船舶设计实用手册·总体分册, 北京: 国防工业出版社, 1998.12
- [74] 顾敏童, 船舶设计原理, 上海: 上海交通大学出版社, 2003, 7
- [75] 本刊编辑部, 造船文摘, 新西兰富勒公司引入 WaveMaster 32m 双体船, 1995-1999
- [76] Kailua-Kona, Swath Software Creates Wings on Water, National Defense Center of Excellence for Research in Ocean Science, 2000, 3 (1)
- [77] Andrew Robert, Formation Design Systems, HSB, vol.53, No.2, Feb.2004
- [78] Andrew Robert, MacSurf an Early NURBS Shiphull Design System: a Historical Note, Computer-Aided Design, 2002, (34)
- [79] 盛振邦, 刘应中, 船舶原理, 上海: 上海交通大学出版社, 2003
- [80] 施内克卢特, H. (Schneekluth, H.), 潘伟文, 船舶设计, 上海: 上海交通大学出版社, 1989
- [81] 国际海事组织, 国际高速船安全规则, 北京: 人民交通出版社, 1995
- [82] Victor A. Dubrovsky, Konstantin. Matveev, The Influence of the Weight of Power Systems on the Performance of Fast, Long-Range Sealift Ships with a Small Waterplane Area, Naval Engineers Journal, WINTER2004
- [83] 杨樵, 裘泳铭, 干货船的主要尺度分析, 上海交通大学学报, 1978, (1)
- [84] 王青, 日本“海鸥”号小水线面双体客船, 船舶工业技术经济信息, 1999, (8)
- [85] 王青, 高鸿宾编译, 日本“海鸥 2”号小水线面高速客船, 船舶工业技术经济信息, 2000, (10)
- [86] 刘淮, 郑明, 丹麦 Mai Mols 号小水线面双体高速渡船, 船舶工业技术经济信息, 2000, (10)
- [87] Seidl, L.H., Cilford, W.F., Cummings, J.P., Design and Operational Experience of the SWATH Ship Navatek I. Marine Technology, July 1993, 30 (3)
- [88] 李晔, 用于海洋监测的小水线面双体船设计的构想及分析, 海洋技术, 2001, 20 (2)
- [89] 盛振邦, 杨尚荣, 陈雪深, 船舶静力学, 上海: 上海交通大学出版社, 1992
- [90] 杨绘生, 对船舶稳性的再认识, 航海技术, 2003, (2)
- [91] 时明曙, 船舶稳性设计应注意的几个问题, 水运科技信息, 1998, (4)
- [92] 李培勇, 裘泳铭, 顾敏童, 许统铨. 多体船完整稳性计算. 上海交通大学学报, 2002, (2)
- [93] Alberto Francescutto, Intact Ship Stability – The Way Ahead, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Ship Workshop, Webb Institute, 2002
- [94] Nigel Gee, Edward Dudson, Anthony Marchant, Hans Steiger. The Pentamaran A New Hull Concept for Fast Freight and Car Ferry Applications. 13th Fast Ferry International Conference, Singapore, 1997
- [95] 胡威, IMO 高速船规则有关稳性和载重线内容修改的会议简介, 上海造船, 1999, (2)
- [96] 中国船级社, 钢质海船入级与建造规范, 第八篇, 北京: 人民交通出版社, 2002
- [97] 中华人民共和国船舶检验局, 船舶与海上设施法定检验规则, 第四篇, 北京: 人民交通出版社, 1999
- [98] 中国船级社, 海上高速船入级与建造规范, 北京: 人民交通出版社, 1996
- [99] 邱文昌, 对应于 IMO 稳性衡准要求的船舶许用重心高度计算原理, 上海海运学院学报, 1997, 18 (2)
- [100] 陈坚, 对一艘双体集装箱船的稳性计算与探讨, 江苏船舶, 2001, 18 (3)
- [101] 林宁, 张金铭, 高速船的完整稳性衡准研究, 海洋科技, 1996, (5)
- [102] 董艳秋, 纪凯, 黄衍顺, 波浪中船舶横摇稳性的研究, 船舶力学, 1999, 3 (2)
- [103] 陈雪深, 邵世明, 陈国权等, 双体船稳性衡准中的横摇角公式, 上海交通大学学报, 1997, (2)

- [104] 阮景华, 船舶复原力臂曲线含义及应用探讨, 广西交通科技, 1994, 19 (4)
- [105] Hill C J R, Merchant A A. Trimaran Ferry for West Coast Canadian Services, Msc in Naval Architecture Ship Design Exercise Report, Mech. Eng. Dept. UCL, 1993
- [106] Armstrong NA, A New Generation of Large Fast Ferry-from Concept to Contract Reality, Seventh International Conference of Fast Sea Transportation (FAST' 03), Ischia, Italy, Keynote speech, Oct 2003
- [107] 王云煌, 大倾角稳性一大风浪中船舶安全之保证, 世界海运, 1996 (2)
- [108] 沈华, 船舶稳性与强度计算, 大连: 大连海事大学出版社, 2001
- [109] 陈铁云, 陈伯真, 船舶结构力学, 上海: 上海交通大学出版社, 1991
- [110] Goldberg L L, Toker R G. Stability and Buoyancy Criteria for Low-Waterplane Catamaran, Paper for Presentation at the 31<sup>st</sup> Annual Conference of the Society of Aeronautical Weight Engineers, 1972, Inc Atlantic (Georgia), 1972
- [111] 郭值学, 高性能船的发展与前景之我见, 中国造船, 2004, 45 (1)
- [112] 黄鼎良, 李向群, 小水线面双体船纵向运动的控制, 大连工学院学报, 1987, (26)
- [113] 葛纬桢, 郭值学, 小水线面船的运动稳定性, 中国造船, 2000, 41 (3)
- [114] 刘志华, 董文才, SWATH船纵向运动性能分析, 海军工程大学学报, 2004, 16 (6)
- [115] 中国船级社, 小水线面双体船设计与建造指南(2004), 北京: 人民交通出版社, 2004
- [116] 中国船级社, 非高速小水线面双体船建造指南(2005) (评审稿), 上海规范所, 2005.2
- [117] Kwok Fai Cheung, Ludwig H Siedl, Suqin Wang, Analysis of SWATH Ship Structures, Marine Technology and SNAME News, New York: Apr 1998, 35 (2)
- [118] 周永青, 4590 车位汽车运输船结构设计中的几个问题, 船舶, 1999, (10)
- [119] 尹群, 姚震球, 阳雷军, 小水线面双体船全船应力分布的有限元分析, 船舶工程, 2001, (2)
- [120] Pegg, N. G., Gilroy, L. E., Kumar, R., Full Scale Verification of Finite Element Modelling of a 75 Tonne SWATH Vessel, Marine Structures, 1995, 8 (3)
- [121] Pu, Y., Das, P. K., Faulkner, D., Structural System Reliability Analysis of SWATH Ships, Engineering Structures, December 1996, 18 (12)
- [122] Cheung, K.F., Seidl, L.H., Wang, S., Analysis of SWATH ship structures, Marine Technology, SNAME, 1998, 35 (2)
- [123] Pu, Y., Das, P.K., D. Faulkner, Structural System Reliability Analysis of SWATH Ships, U.S.A.: Jnl of Engineering Structures, Dec. 1996, 18 (12)
- [124] 郑莎莎, 郑梓荫, 李润培等, 小水线面双体船的结构设计和强度分析, 上海造船, 2004, (2)
- [125] 郑莎莎, 郑梓荫, 小水线面双体船船体结构问题初探, 船舶工程, 2005, (154)
- [126] 郑莎莎, 郑梓荫, 小水线面双体船的船体结构问题, 第四届国际新型船舶和海事技术学术会议, 上海, 2004
- [127] 刘和炜, 小水线面油田交通船主体结构设计初探, 船舶设计通讯, 2002, (3-4)
- [128] 于洋, 洪碧光, 魏云雨, 小水线面双体船综述, 航海技术, 2001, (6)

## 致 谢

论文的完成意味着我的学生生涯将暂告一段落。

难以忘怀的是在交大求学期间师长、同学、亲友无尽的关怀、支持与鼓励。

首先向导师何炎平副教授致以最诚挚的谢意。何老师平日事务繁忙，但总是设法抽出时间来关心我的学业和生活，在课题研究上给予我悉心的指导，提出过很多中肯的建议，并讨论细节及缺失。何老师深邃开阔的视野、严谨治学的风范、宽厚随和的为人、开拓创新的精神以及精力充沛的气质令我由衷钦佩，印象至深。恩师的言传身教将使我受益终生！

感谢谭家华教授两年多来对我学习、生活上的关照和提携。

感谢刘亚东博士后的热情鼓励和不厌其烦的指导，并提供了其关于 HYSWATH 的研究报告，与您一起的讨论交流总让我收获颇丰。

澳大利亚 Formation Design System Pty Ltd. 的 Andrew Mason 先生通过电子邮件，给予笔者在学习 Maxsurf、Hydromax 等软件模块时大量的意见和帮助，并提供了颇有参考价值的文献资料，且对本课题研究工作给予了热情鼓励，在此深表感谢。

感谢上海船厂的朱振涛研究员、巴柏塞斯船舶科技（上海）有限公司的宗知谊工程师在软件学习并对论文中 SWATH 船的稳性分析工作中，给予的帮助、忠告和意见。

感谢中船工业集团七〇八研究所任毅、尚报国同志为本文提供了参考资料。

感谢中国船级社南京分社的周华斌验船师提供的关于船舶现场建造的信息，并在论文开展过程中提供了不少规范资料和诚恳建议。

感谢同班的王俊硕士、刘舒硕士、李晓硕士在论文完成的过程中提供的学习、生活上的帮助。

还要衷心感谢已毕业的卢晨硕士，曾在考研复习期间为我提供了大量帮助，助我实现了进入上海交通大学深造的夙愿。并且在论文准备和撰写阶段，向笔者传授了丰富的经验，促成这篇论文的完成。

感谢刘文华硕士、王亚梅硕士、李斌博士在电脑使用及软件问题上提供的方便、帮助和意见。

感谢 B0301091 班的全体同学，和你们的朝夕相处，让我的硕士生活充实愉快，能够多姿多采。临别之际，向全体同学道声珍重。

特别感谢我的父母，你们的鼓励信任和殷切期望是我不懈进取的原动力。我有幸在一个充满爱与温馨的家庭环境中自由成长；没有你们的全力支持，我不可能顺利完成这些年来的求学历程。

谨以此文献给我的老师、父母、朋友和同学，以表达我内心的感激之情。

## 附录：攻读硕士学位期间发表的论文

科 研 论 文				
	论文题目	刊物名称	发表年月	第几作者
1	几种新型深海锚泊型式概念	中国海洋平台	2005.04	第一作者
2	SWATH交通艇的方案设计 及其稳性分析	船舶工程	已录用	第一作者

# 小水线面双体船方案设计及稳性研究

作者：[徐蓉](#)

学位授予单位：[上海交通大学](#)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_D017883.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_D017883.aspx)