



SWATH船的 稳定鳍优化与鲁棒控制

刘 强 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

014013212

U674.951
01

SWATH 船的稳定鳍 优化与鲁棒控制

刘 强 编著



U674.951

01

上海交通大学出版社



北航

C1700560

内容提要

本书在详细分析了波浪中 SWATH 船的纵向运动性能和稳定鳍尺寸、安装位置等参数对 SWATH 船纵向运动稳定性和机动性影响的基础上,建立了 SWATH 船稳定鳍方案的多目标优化数学模型,并利用多目标遗传算法对其进行了优化求解。

图书在版编目(CIP)数据

SWATH 船的稳定鳍优化与鲁棒控制 / 刘强编著. —

上海: 上海交通大学出版社, 2013

ISBN 978-7-313-10506-6

I. ①S… II. ①刘… III. ①小水线面船—双体船—船舶稳定性—研究 IV. ①U674.951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 257851 号

SWATH 船的稳定鳍优化与鲁棒控制

编 著: 刘 强

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 常熟市文化印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 145 千字

版 次: 2013 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-10506-6/U

定 价: 32.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 8

印 次: 2013 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-52219025

前言

SWATH 船是一种具有优良耐波性的新型高性能船舶。与常规的单体船相比,它具有自然运动周期长,运动幅度小,波浪中失速少,砰击、上浪及乘员的晕船概率低等优点。由于其水线面积较小,船的纵倾恢复力矩相应减少,随着速度的增加,作用在下潜体上的 MUNK 力矩会以速度的平方迅速增加,容易发生纵向失稳。目前,解决这一问题的主要方式是在下潜体内侧安装稳定鳍。因此,稳定鳍尺寸和安装位置的确定就成为 SWATH 船建造过程中的一个重要环节。

稳定鳍不但是平衡水动力纵倾力矩保证 SWATH 船纵向运动稳定的一个重要工具,而且它对 SWATH 船的机动性、波浪中的运动性能以及阻力特性等方面都有较大的影响。为了获得一组较好的稳定鳍方案,就必须在稳定鳍方案的设计过程中充分考虑上述各因素的影响。为此,本书在详细分析了波浪中 SWATH 船的纵向运动性能和稳定鳍尺寸、安装位置等参数对 SWATH 船纵向运动稳定性和机动性影响的基础上,建立了 SWATH 船稳定鳍方案的多目标优化数学模型,并利用多目标遗传算法对其进行了优化求解。然后,进一步建立了稳定鳍方案的多指标评价体系,并利用多级模糊综合评价法对其进行了评价,以从优化得到的 Pareto 最优解中确定最满意的稳定鳍方案。

虽然安装设计合理稳定鳍的 SWATH 船本身在波浪中具有较好的运动性能,但是对稳定鳍采取一定的控制措施以进一步改善 SWATH 船的运动性能也是必要的。考虑到实际 SWATH 船纵向运动控制系统所具有的不确定性,本书采用鲁棒控制理论对其进行了控制研究。并结合线性矩阵不等式理论和概率鲁棒性能分析思想,提出了一种针对参数不确定系统的新控制器设计方法。此方法不但能充分考虑系统的鲁棒性能要求,而且能将闭环系统的极点配置到指定区域以改善系统的动态性能,而且此方法还具有设计过程简单、保守性小以及受不确定参数进入

系统的方式影响较小等优点。最后,本书针对 SWATH 船的参数不确定模型和混合不确定模型,采用概率鲁棒控制方法和 μ 综合控制方法分别对其进行控制研究,并取得了较好的控制效果。

本书在编写过程中得到江苏高校优势学科建设工程项目的资助,在此表示诚挚的感谢,同时,感谢李国斌、梁利华教授对本研究工作的指导。书中的不足或错误之处,敬请读者批评指正。

作者

2013 年 11 月

索引

μ 综合控制 8, 89, 96, 97, 102~104
 H_∞ 概率鲁棒控制 77, 78, 104
Pareto 多目标遗传算法 59, 61, 78
参数不确定模型 8, 78, 80, 88, 104
长峰波随机海浪 8, 9, 23, 29, 103
多级模糊综合评价 62, 71, 103, 104
多目标决策 62
多目标优化 8, 56~60, 71, 77, 78, 103
二维势流 10, 11, 14
混合不确定模型 8, 93, 104
结构及性能特点 2
静态恢复力系数 10
临界稳定航速 8, 34
黏性阻尼系数 15, 17
评价指标体系 62, 63, 71, 103
切片理论 6, 9~11, 16, 30

区域极点约束 72, 76, 78, 81, 104
水动力系数 2, 8, 10, 11, 14, 18, 21, 24, 30, 32
水动力纵倾力矩 8, 30, 52~58, 62
水动升力 15, 18
稳定鳍 1~3, 6~8, 24, 30, 35~37, 39, 40, 42~48, 52, 53, 55~57, 60~62, 64~71, 81, 103, 104
稳定性和机动性 8, 30, 55, 103
稳定性判据 32, 34, 36
小水线面双体船 1~5
纵向强迫运动方程 42
纵向运动控制系统 6~8, 78, 79, 88, 89, 93~96, 102~104
纵向运动数学模型 9, 29, 30
纵向运动响应 22

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 概述	001
1.2 SWATH 船的结构及性能特点	002
1.2.1 SWATH 船的结构	002
1.2.2 SWATH 船的性能特点	003
1.3 国内外研究现状	005
1.3.1 国外研究现状	005
1.3.2 国内研究现状	007
1.4 研究内容和工作	008
第 2 章 SWATH 船的纵向运动数学模型	009
2.1 波浪中 SWATH 船的纵向运动数学模型	009
2.2 水动力系数的理论计算	010
2.2.1 静态恢复力系数的计算	010
2.2.2 势流运动假设下水动力系数的计算	011
2.2.3 黏性阻尼系数的计算	015
2.2.4 与鳍相关部分水动力系数的计算	018
2.3 SWATH 船的纵向运动响应及统计值计算	022
2.4 长峰波随机海浪中扰动力和力矩的计算	023
2.5 SWATH 船的纵向运动仿真	024
2.6 本章小结	029
第 3 章 SWATH 船纵向运动的稳定性和机动性分析	030
3.1 静水中 SWATH 船的纵向运动数学模型	030
3.2 SWATH 船纵向运动的稳定性判据	032
3.3 SWATH 船纵向运动的三个特征参数	033

3.4 航速对 SWATH 船纵向运动稳定性的影响	034
3.4.1 临界稳定航速	034
3.4.2 航速变化对纵向运动稳定性的影响	036
3.5 稳定鳍对 SWATH 船纵向运动稳定性的影响	037
3.5.1 稳定鳍纵向位置的影响	037
3.5.2 稳定鳍尺度变化的影响	039
3.6 SWATH 船纵向运动的机动性分析	042
3.6.1 纵向强迫运动方程及其传递函数	042
3.6.2 纵向运动的阶跃响应	044
3.7 航速对 SWATH 船纵向运动机动性的影响	047
3.8 稳定鳍对 SWATH 船纵向运动机动性的影响	048
3.9 水动力纵倾力矩的计算	052
3.9.1 势流压力形成的水动力纵倾力矩计算	053
3.9.2 黏性引起的水动力纵倾力矩计算	054
3.10 本章小结	055
第 4 章 SWATH 船稳定鳍方案的确定	056
4.1 SWATH 船稳定鳍方案的多目标优化	056
4.1.1 SWATH 船稳定鳍方案的多目标优化模型	056
4.1.2 带约束的 Pareto 多目标遗传算法	059
4.1.3 SWATH 船稳定鳍方案的优化步骤	060
4.2 SWATH 船稳定鳍方案的多目标决策	062
4.2.1 SWATH 船稳定鳍方案的评价指标体系	062
4.2.2 稳定鳍方案的多级模糊综合评价	062
4.3 仿真研究	066
4.4 本章小结	071
第 5 章 SWATH 船具有区域极点约束的 H_{∞} 概率鲁棒控制研究	072
5.1 系统的 H_{∞} 性能分析	072
5.2 D 稳定性分析	073
5.3 概率鲁棒性能分析	075
5.4 具有区域极点约束的 H_{∞} 概率鲁棒控制器设计	076
5.5 SWATH 船纵向运动控制系统参数不确定模型	078
5.6 SWATH 船具有区域极点约束的 H_{∞} 概率鲁棒控制仿真	081
5.7 本章小结	088

第 6 章 SWATH 船纵向运动的 μ 综合控制研究	089
6.1 问题描述	089
6.2 μ 的定义及意义	091
6.3 μ 的计算	091
6.4 μ 控制器的 $D-K$ 递推设计	093
6.5 SWATH 船混合不确定模型的建立	093
6.6 SWATH 船 μ 综合控制器设计	096
6.7 仿真分析	097
6.8 本章小结	102
第 7 章 结论	103
附录	105
参考文献	108

第 1 章 绪论



1.1 概 述

近年来,随着海上运输方式的多样化以及人类对海洋资源的积极开发,对船舶性能的要求也逐渐发生变化。就海上运输来说,由过去只注重载荷性能和静水中的快速性能而一味追求大型化和高速化的倾向,转为注重提高船舶在波浪中的性能。在客渡船方面,为实现定期航行、高效运输以及舒适乘坐,提高船舶的耐波性和节能被摆到了重要位置;在海洋开发方面,为了能在高海情下的广阔海域进行海洋调查、观测、作业以及为海洋平台输送人员等,迫切需要在波浪中具有较高安全性、稳定性和舒适性的多用途船舶;在军舰方面,为了使舰艇在宽阔的海域和恶劣的海情下执行任务,也迫切需要有波浪中能达到高性能要求的舰船。这就导致了对耐波性优良的新船型的研制和发展。小水线面双体船(small water-plane-area twin hull, SWATH)正是这样一种耐波性能极其优良,中、高速下阻力小,甲板面积相当宽敞,可以完成多种使命,满足各种航海要求的新船型。其设计概念早在 1905 年由美国人 Nelson 提出,1932 年 Faust 提出了 SWATH 船的初步设想,1946 年加拿大人 Creed、1967 年美国人 Leopold 进一步予以完善并申请专利。这些设计在低速和中速时的性能较好,但都没有解决纵向运动稳定性这个对航行安全至关重要的问题。1971 年,Lang 提出了一个接近现有 SWATH 船的设计方案,用一根连接两个片体的横梁来保证船的纵向运动稳定性。随着研究的深入,目前,解决这一问题的普遍有效手段是加装稳定鳍,而且稳定鳍的安装位置、鳍型以及尺寸都对 SWATH 船的纵向运动稳定性和运动性能有重要的影响。因此,稳定鳍方案的确定就成为 SWATH 船设计过程中具有重要意义的一个环节^[1,2]。

为了适应特殊作业平台和高舒适性要求(前者如水文调查、水声监听、海洋考察和军用辅助等,后者如观光旅游、客渡和娱乐等),往往对稳定鳍采用手动或自动

控制措施。据不完全统计,截至 2000 年 6 月,世界上已建造的小水线面双体船为 53 艘,其中具有控制系统的达到 37 艘,占总建造量的 70%^[3,4]。由此可见,控制系统对进一步降低船运动幅值的重要性。然而,大多数 SWATH 船的自控系统是按单变量经典控制理论进行设计的,存在许多不足之处^[5]。因此,有必要针对 SWATH 船的特点,进一步采用多变量优化设计理论对稳定鳍的控制系统设计进行研究。

实际的 SWATH 船纵向运动系统是一个复杂的非线性动力学系统,要得到其准确的数学模型是非常困难的。工程中,一般采用“小扰动法”对其线性化,其中的水动力系数是通过船模或实船试验测得的,有些是很难准确测得的,就算能准确测得实际的应用中也不可避免存在误差。同时,由于外部环境的变化,SWATH 在工作过程中会受到许多不确定扰动因素的影响。因此,在稳定鳍的控制中充分考虑 SWATH 船纵向运动的鲁棒稳定性和鲁棒性能具有重要实际意义。

1.2 SWATH 船的结构及性能特点^[6-9]

1.2.1 SWATH 船的结构

小水线面双体船又称为半潜式双体船(semi-submerged catamaran, SSC)。它从本质上讲仍属于排水型船,但同传统的排水型双体船相比,具有特殊的船体结构(见图 1.1)。这种船型兼容了潜艇、水翼艇和双体船的许多优点,而又克服了这些船相应的缺陷,成为综合性能比较优秀的新船型。它主要由三大部分组成,即水上平台、下潜体和支柱。其中,下潜体和支柱的组合体称为片体。

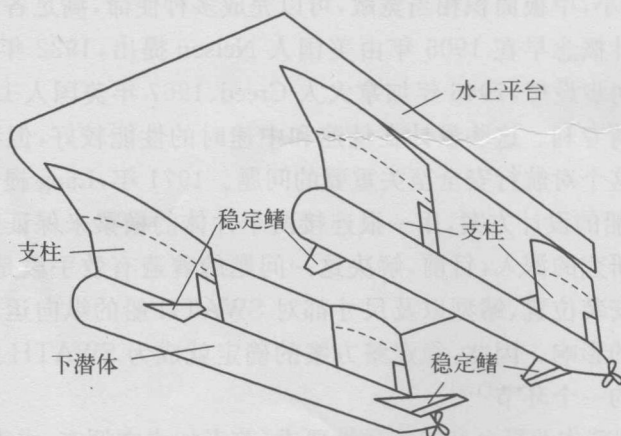


图 1.1 SWATH 船型示意图

1) 水上平台

它是高踞于水面之上的平台结构,外形像只长箱子。长宽比约为 $2\sim 5$ 。该结构形式使小水线面双体船有宽阔的甲板面积和宽敞的舱室容积,易于布置众多的武器装备和仪器设备。可根据所担负的任务和使命来布置各种武备、机库、海洋监视设备、停放飞机及运输集装箱货物等。

2) 下潜体

它是两个相互平行且对称的鱼雷状船体,像两艘隐蔽在水中的潜艇。它提供了小水线面双体船的主要浮力成分。一般为船体总浮力的 $60\%\sim 75\%$ 。有的下体采用长轴为水平方向的椭圆形柱体,其好处是可降低船吃水,增大垂向运动阻尼。下体内一般布置燃油舱、淡水舱、压载水舱、推进器、传动机构以及鳍翼的控制执行机构等。

3) 支柱

它呈双凸、细薄、流线型截面。它从下体向上穿割水面,将上、下体连成一个整体。是上、下体间的联系通道。小水线面双体船的水线面是这些支柱的横截面,它的水线面积相当于排水型常规单体船的四分之一左右。这使小水线面双体船不仅受波浪质点运动影响小,而且受到的扰动力也大为减少。下体内侧对称地装有各式稳定鳍,可控制舰船在波浪中的运动和航行状态。

1.2.2 SWATH 船的性能特点

SWATH 船借助于两个潜入水下的鱼雷状浮体通过若干个流线型支柱来支撑水面上方的主船体,其水线面积是很狭小的,仅相当于排水量型常规单体船的四分之一左右。因此,它既拥有潜艇和水翼艇所具备的兴波阻力小、受波浪干扰小的特点,同时它又具有双体船的甲板面积大、复原力臂大的特点。其综合结果表现在小水线面双体船具有较好的快速性、优良的耐波性、杰出的可布置性以及良好的稳性等优点。

1) 耐波性

SWATH 船的最大优点是耐波性比一般单体船要好得多。在同样条件下,其纵摇、横摇、垂荡的幅值都小得多,在高海况下一般不会出现底部砰击和甲板上浪等现象。这在实船和模型试验中都得到了证实。

最明显的是 1978 年美国所做的一次小 SWATH 船与单体船的耐波性比较试验。这次试验用三条船作并排的航行试验,一条是 220 t 的“卡玛利诺”号小水线面双体船,另外两条都是海岸警卫队的单体船(一条是 100 t 的巡逻艇,另一条是 3100 t 的远海巡逻警戒舰)。试验结果表明,220 t 的小水线面双体船在海浪中的摇摆情况与 3100 t 的单体船差不多,横摇的情况比 3100 t 的船更好,纵摇也比它好些;与 100 t 的艇相比,则摇摆的幅值降低 $2/3\sim 3/4$ 。

1976 年美国曾在“卡玛利诺”号上验证小水线面双体船与直升机起降的兼容性。从静水到四级海况下(有义波高 $0 \sim 2.44 \text{ m}$)完成了 80 次以上的起降,其中有一次是在三级海况中船停在水中降落的。根据飞行员的反映,在进场和降落时甲板摆动小,降落方便。并且认为,该艇在大浪中的摇摆程度与载直升机的舰(例如 4100 t 的 FF1052 型护卫舰)在比较平静的海浪中的情况差不多。

一般认为垂向加速度越大越容易引起船员晕船。根据美国海军所采用的晕船标准和国际标准化组织(ISO)制订的船员工作效率降低标准的有关资料确认,在 3~6 级海况下,2300 t 的单体船的垂向加速度特性位于晕船区内,而同吨位的 SWATH 船只有 5% 的人员位于晕船线之内,而且远离 ISO 的疲劳区。

其耐波性之所以这么好,主要原因是由于水线面狭小,从而使引起船体摇荡的激励力也小,加上水下有两个圆筒体,当船摇荡时产生了很大的阻尼力。由于水线面小,还可能将船设计得具有较大的固有摇荡周期,从而避开与中等以下海浪主要波频成分的谐振。近来美国人又对采用向下张开的支柱进行了研究。由于采用了张开式支柱,当船摇荡时增加了附加质量和摇荡阻尼,从而进一步加大摇摆固有周期,并使谐振的峰值减少。

在单体船上用减摇鳍只能减少横摇,对纵摇和垂荡没有多大效果。但由于 SWATH 船水线面狭长,纵倾力矩相对比较小,有可能采用艏艉水平控制面,加上自动控制,同时控制纵摇、横摇和垂荡,从而进一步减少了船的摇荡。另外,还可控制船在不同航速时的航行姿态。

2) 甲板面积

SWATH 船的另一个优点是甲板面积相对来说比较大。在同样排水量下,其长度比单体船短 $30\% \sim 45\%$,宽度则要大 $60\% \sim 70\%$ 。另外,由于其甲板呈长方形,所以甲板面积要比甲板尖瘦的单体船大 $40\% \sim 50\%$ 左右。这就使 SWATH 船非常适用于需要甲板面积比较宽敞的舰艇。

3) 阻力与推进

由于 SWATH 船水线面小,船体主要部分在水下,因此其兴波阻力要比相应的单体船小,在较高的航速下更是如此。另一方面,由于 SWATH 船的湿表面积比相应的单体船大,因此摩擦阻力比较大。总起来看,在低速时由于摩擦阻力占主要成分,所以小水线面双体船的阻力较大,而在高速时,兴波阻力占主要成分,因此其阻力可以相应减低。但小水线面双体船在高速时还出现支柱的喷溅阻力。

虽然如此,由于后螺旋桨的安装条件比较好,浸水较深,轴系基本无斜度,来流比较畅通,螺旋桨的直径基本上不受限制,因此推进效率可以提高。据报道,一般单体船的推进效率为 $0.62 \sim 0.67$,而小水线面双体船的推进效率可达 0.75 。

SWATH 船在推进方面的一个最大优点是在波浪中的失速小。这主要是因为它在波浪中的摇荡比较小。据有关资料表明,在同样排水量和同样的主机功率下,

由于双体船的湿表面比较大,所以航速一般要比单体船低 5%~10%。当浪高超过 2 m 时,由于单体船受到船的骑浪品质、甲板上浪和船底砰击的影响,需要相继开始人为降速。对于小水线面双体船来说,则主要是由于在风浪中阻力略有增加而平缓地降速,直到遇到超过承担能力的浪高时,航速才有较大的下降。据日本 350 t 的“海鸥”号小水线面双体船证实,在四级海况下最高航速可达 24 kn,失速不到 2%,估计在五级海况下的失速也只有 5%。1983 年美国海军曾做过一个调查,在北大西洋,护卫舰只有 45% 的时间可用全速航行,驱逐舰和巡洋舰则为 79%,其他时间由于海浪的关系而需要主动降速。

4) 操纵性

由于 SWATH 船有两个延伸很长的支柱,因此其航向稳定性特别好,基本上不需要打舵就能直线航行,因而对拖曳声呐的工作和声呐数据的处理都带来很大好处。

SWATH 船的低速回转性能也相当好。靠两个在螺旋桨后面的舵和两个相距较远的螺旋桨的差动,可以做到无航速下就地回转。

高速时,在支柱上产生较大的使船直线航行的稳定力矩。但这时舵角也有所提高。测试表明,在航速 16 kn 下测出的回转直径约为船长的 6 倍,而一般单体船相应为船长的 3~4 倍。但如果考虑到小水线面双体船的船长一般要比单体船短 30%~45% 的话,其高速回转的绝对能力与单体船差不多。由于双体船低速时的阻力比单体船的大,因此航行中停车后的冲程肯定比单体船短。

5) 稳性和不沉性

对 SWATH 船来说,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。SWATH 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 SWATH 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,SWATH 船的复原力臂曲线下所含面积要比单体船大好几倍。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国外研究现状

SWATH 船的概念虽然早在 1905 年就有人提出,但其真正的成熟和发展并逐步完善是从 20 世纪 70 年代初开始的。随着“卡玛利诺”号的建成下水,人们对

SWATH 船的研究和认识都达到了一个新的水平。在这之前的三五年里,研究人员已经对 SWATH 船的特性进行了相应的理论探索和研究。在随后的三四十年里,小水线面船的数量不断增加,目前,世界上已经有 10 个国家开发和拥有 SWATH 船共约 50 艘。人们对 SWATH 船的研究主要是通过理论预报、实船试验和船模试验的方式来完成的。其中,C. M. Lee 等^[10,11]利用切片理论,在充分考虑横向流动阻力和水的黏性影响后对 SWATH 船的运动性能、波浪载荷以及结构强度进行了理论分析和计算。通过跟船模试验结果的比较来看,利用切片理论对 SWATH 船进行预报能够取得较好的预报效果^[12]。在此基础上,S. Hong Young^[13,14]对黏性阻尼项进行了修正并考虑了纵荡对纵摇力矩的影响,然后进一步针对切片理论的局限性利用统一细长体理论对 SWATH 船进行了预报,取得了成功。同时,经过 C. M. Lee 等的分析发现;由于具有较小的水线面,当航速达到一定值后 SWATH 船可能发生纵向运动不稳定^[10,11]。为了解决这一问题,研究人员提出了加装稳定鳍的方式来避免纵向运动失稳。C. M. Lee^[11-13], Killio^[15], Wu June-Young^[16,17]等研究了稳定鳍对 SWATH 船稳定性及运动性能的影响,并给出了确定稳定鳍尺寸和安装位置的一般原则和方法。Stahl 等^[2]则在此基础上给出了稳定鳍方案的初步优化方法。这一方法的基本原理是先通过初步确定稳定鳍各参数的变化范围,将其离散化得到一个稳定鳍方案的集合,然后通过计算安装不同鳍时 SWATH 船的运动性能,确定出一组或几组鳍备选,最后通过试验验证确定最终的稳定鳍方案。由于稳定鳍方案的设计需要考虑的影响因素非常多,这种设计方式的设计效率显然是非常低的。McCreight 等^[18,19]对 SWATH 船船体上的升力、横向流动阻力以及鳍上升力的计算方法进行了改进。上述对 SWATH 船水动力性能的分析主要是在频率域中进行的,M. C. Fang 等^[20-28]则利用时域的方法对 SWATH 船水动力的特性,以及固定鳍和可控鳍对 SWATH 船运动影响进行了分析研究。从研究结果来看时域方法更能有效地考虑水的黏性计算和鳍角饱和等非线性因素的影响。Stenson^[29]和 Kallio^[30]等则通过实船试验对 SWATH 船的耐波性、振动特性、瞬间响应、结构和回转性能等各方面进行了综合试验研究。Sobolewski^[31]、Chapman^[32]等则对 SWATH 船的下潜体、支柱和稳定鳍等结构的阻力性能进行了理论分析和试验研究。Goldberg^[33]和庄盛隆^[34]等分别对 SWATH 船的稳性和桥体砰击等方面进行了研究。

经过研究鳍对 SWATH 船运动影响,发现稳定鳍不但能保证 SWATH 船的纵向运动稳定,而且对改善运动性能也有重要的作用。对稳定鳍加以控制是必要的,目前对这方面的研究还相对薄弱。经初步调查某些 SWATH 船的自控系统发现,大多数是按单变量经典控制理论进行设计的,而 SWATH 船的纵向运动控制系统是典型的多变量系统,因此存在不足之处。一些研究人员也看到了这一点,并采用现代控制理论对其进行了一定的研究^[5]。Gilbert^[35]和 Zarnick^[36]等

分别利用线性二次型理论(LQT)对 SWATH 船的纵向运动进行了控制研究,但这一方法存在明显的缺点,即鲁棒性差。M. C. Fang 等^[23-25]首先利用“棒-棒”控制理论对 SWATH 船进行了控制研究,考虑到其在实际中难以应用,又采用了模糊控制的方法,并对其进一步改进加入了自适应机制,提高了其自适应能力。

1.3.2 国内研究现状

20 世纪 70 年代后期,我国开始 SWATH 船的研究工作,并一直跟踪 SWATH 船的基础理论研究、模型试验,取得了丰富的研究成果。但这些成果主要是集中在水动力特性分析^[37-47]、稳定性^[5,48-50]、船型优化设计^[51-57]等方面,如中国船舶科学研究中心(CSSRC)、中国船舶及海洋工程设计研究院(MARIC)、上海船舶设计研究院(SDARI)、大连理工大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、海军工程大学、武汉船舶设计研究院等单位在这些方面都取得了一定的研究成果。但对稳定鳍设计和控制等方面的研究工作还不是很充分。文献[7,9,48]通过分析稳定鳍面积和安装位置等参数对 SWATH 船纵向运动稳定性的影响,给出了稳定鳍方案确定的一些基本原则和方法。文献[58]通过对同一排水量下几个不同重心纵向位置时的船模拖曳阻力试验分析,提出了一种通过船模试验确定 SWATH 船姿态控制所需鳍面积的方法。此方法是以能够满足 SWATH 船姿态控制需要为基本原则来确定稳定鳍的面积,对其他方面性能考虑较少。在稳定鳍的控制方面,文献[4]针对 SWATH 船的多输入和多输出特性,采用状态空间的方法,为系统设计了比例+微分反馈控制系统,并建立了 SWATH 船纵向运动控制系统的试验模型,进行试验研究和分析。研究取得了一定的效果,但控制器参数仅是针对某一频率来确定的,而且需要对有关运动导数和前后鳍的升力特性进行精确的测量,鲁棒性差。文献[7,9]采用最优控制理论对 SWATH 船的纵向运动进行了控制研究,并对控制效果进行了仿真。文献[59]采用 LQR 控制方法对 SWATH 船的纵向运动进行了控制研究,同样也存在鲁棒性差的缺点。

综合现有文献资料来看,我国目前在稳定鳍方案设计方面的研究还不够系统和完整,大多数设计方法设计过程复杂,工作量大,经验性较强,而且难以充分发挥稳定鳍在改善 SWATH 船运动性能方面的潜力。对稳定鳍方案优化等方面的研究更是鲜有报道。在控制方面虽然也针对 SWATH 船纵向运动控制系统的多变量特性进行了一些研究,但都不同程度地存在一些缺点和不足,难以满足实际应用的要求。此外,由于 SWATH 船的特性和水动力导数等方面尚存在不少不确定性,在进行控制研究时充分考虑系统的鲁棒性是非常必要的^[5]。

1.4 研究内容和工作

SWATH 船的结构特点决定了它的六自由度耦合运动可以近似为纵向运动(即垂荡和纵摇的耦合运动)、横向运动(即横摇、艏摇和横荡运动的耦合运动)和纵荡运动三个独立的部分进行考虑。其中,纵向运动是决定 SWATH 船运动性能和运动稳定性的一个重要方面。因此,本书的内容主要从 SWATH 船纵向运动仿真、纵向运动稳定性和机动性分析、稳定鳍方案的确定以及纵向运动控制等方面进行展开研究和论述。具体的工作和研究内容如下:

(1) 建立 SWATH 船纵向运动系统的数学模型,并对模型中的水动力系数和波浪扰动力进行计算。然后,结合海浪仿真理论对 SWATH 船在长峰波随机海浪中的运动情况进行仿真,以分析系统的运动特点和验证模型的正确性,并为以后的工作奠定基础。

(2) 对 SWATH 船纵向运动的稳定性和机动性进行理论分析,并对现有临界稳定航速的估算公式进行改进,以提高对安装稳定鳍情况临界航速估算的精度。然后,分析航速和稳定鳍的展弦比、面积、安装位置以及鳍的组合形式(如前后组合鳍和仅安装后鳍)等参数变化对 SWATH 船纵向运动的稳定性和机动性的影响,从而为稳定鳍方案的确定和优化设计提供一定的指导和帮助。

(3) 充分考虑稳定鳍各参数对 SWATH 船纵向运动稳定性、机动性、波浪中的运动响应以及对水动力纵倾力矩的平衡等方面影响,并针对后鳍和前后组合鳍两种鳍的组合形式分别建立稳定鳍方案的多目标优化数学模型,以对稳定鳍展长、弦长和安装位置等主要参数进行优化设计。并针对优化模型的特点,采用基于 Pareto 解的多目标遗传算法对其进行优化求解,给出优化求解的步骤。然后,采用模糊多目标综合评价方法对优化得到的一组 Pareto 最优解进行综合评价,以得到最满意的稳定鳍方案。最后,以 SWATH-6A 为例,对稳定鳍方案的确定过程进行仿真分析。

(4) 结合线性矩阵不等式理论和概率鲁棒性能分析的思想,提出一种针对参数不确定系统的新控制器设计方法。使它不但能将闭环系统的极点配置到指定区域,以改善系统的动态性能,而且能对系统的稳态性能进行优化,并保证系统能满足一定的鲁棒性能要求。然后,通过分析建立 SWATH 船纵向运动系统的参数不确定模型,并利用上述控制器设计方法对其进行控制研究。最后,将新的控制器设计方法与现有的确定性鲁棒控制器设计方法进行比较。

(5) 针对 SWATH 船纵向运动控制系统不但存在参数不确定性和外部扰动而且很容易产生未建模动态不确定性的特点,建立 SWATH 船纵向运动的混合不确定模型,并利用 μ 综合控制方法对其进行控制器设计。最后,以 SWATH-6A 为例,对控制效果进行仿真分析。