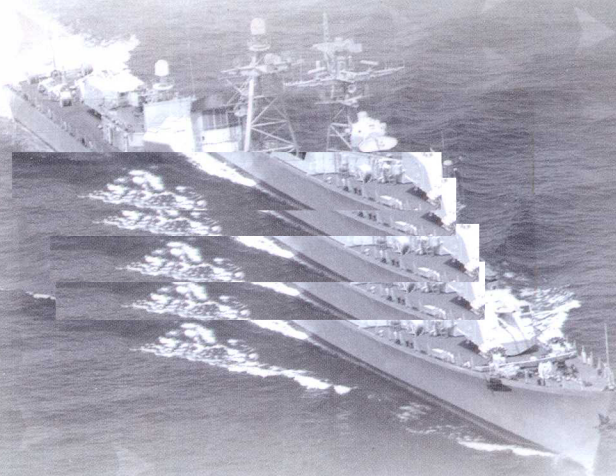


现代船舶控制工程

刘 胜 © 著



科学出版社
www.sciencep.com

现代船舶控制工程

刘 胜 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合作者二十多年来从事船舶控制工程领域的研究工作,详细阐述了船舶航行与姿态控制、船载设备控制等领域的理论、方法和工程应用,尤其是模糊控制、神经网络、遗传算法、支持向量机、鲁棒控制、抗饱和控制等现代控制理论与智能算法在船舶控制工程中的应用研究。主要包括船舶多自由度运动数学建模、船舶横摇减摇鳍模糊控制、船舶航行抗饱和控制、船舶航向/横摇鲁棒控制、船舶航迹/航向神经网络控制、船舶舵/翼舵-鳍/翼鳍联合智能控制、船舶航向及机炉协调支持向量机复合控制、船舶航行控制系统故障在线智能预报、船载三轴稳定平台姿态控制、船舶航迹/航向容错控制等。本书内容丰富,题材新颖,工程背景强,在章节内容上力求完整性与独立性,尤其注重理论与实践的结合。

本书可作为从事船舶控制工程、控制理论与控制工程相关专业的教师、研究生、高年级本科生的课程教材与教学用书,亦可作为船舶控制工程研究和设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代船舶控制工程 / 刘胜著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-029094-6

I. ①刘… II. ①刘… III. ①船舶操纵-控制系统 IV. ①U664.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 188533 号

责任编辑:张艳芬 王志欣 / 责任校对:桂伟利

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 10 月第一次印刷 印张: 38 1/4

印数: 1—2 000 字数: 753 000

定价: 110.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

国家中长期科学和技术发展规划纲要明确指出,在今后一段时间内将重点发展船舶领域信息化和智能化技术,提高造船领域自主创新能力和船用设备配套能力,培育高技术和高附加值产品的开发能力,高度重视船用设备制造本土化,集中解决船用设备配套能力弱的问题。我国现已位居仅次于韩国、日本之后的世界第三造船大国,但还不是一个造船强国,其主要原因是造船附加值低,船用配套设备自主知识产权成果少,自主创新能力低。为了提高我国船舶工业技术水平和经济效益,提高舰船适航性、操纵性、作战能力及现代化水平,需要大力研发具有自主知识产权的船用配套装置设备的高性能智能控制系统,培养具有国际视野和创新能力的高层次人才。

船舶控制工程是船舶工程中一个重要的研究领域,内容涵盖范围广泛,包括船舶航行与姿态控制、主机控制、船载设备控制等众多领域,最终目标在于提高船舶自动化、智能化水平,保证船舶航行的安全性、经济性、适航性。

二十多年来,作者一直从事船舶控制工程领域的研究工作,深感有必要结合本人的一些研究成果及新进展撰写一部学术专著,旨在为推动现代船舶控制工程发展尽微薄之力。

本书从工程应用的角度出发,共分 11 章进行阐述:

第 1 章介绍了船舶现代控制工程的相关知识以及智能控制理论、鲁棒控制理论和抗饱和控制理论的发展概况,为读者阅读本书提供了一个整体性、概略性的了解。

第 2 章详细阐述了船舶多自由度运动建模的数学推导过程以及简化方法,为后续章节涉及的被控对象建模做了理论铺垫,此外本章还给出了海风、海浪、海流干扰的数学模型。该章是学习船舶控制理论的基础,建议读者自己模仿推导学习,这样有利于深层次地领悟船舶控制工程的内涵。

第 3 章详细阐述了船舶横摇减摇鳍模糊控制,将遗传算法引入模糊控制器参数、规则的优化设计中,降低了控制器设计对专家经验的依赖性;此外,提出了一种无级自动切换的变精度控制思想,旨在追求一种结构简单、易于工程实现、控制效果优良的遗传模糊 PID 复合控制系统。

第 4 章详细阐述了船舶航向控制系统抗饱和控制,采用抗饱和控制策略,使得船舶航向控制系统能够快速退出饱和状态,弱化饱和影响,充分发挥系统物理性能,提高闭环控制系统性能,同时节约能耗。该章所讨论的问题对于空间运动体姿

态控制具有通用性和推广价值。

第 5 章阐述了船舶航向/横摇鲁棒控制,分别对单自由度横摇鲁棒控制、航向鲁棒控制、航向/横摇联合鲁棒控制做了深入浅出的讲解,该章涉及参数摄动系统的 LFR、 H_∞ 控制、 μ 综合等内容,为读者揭示了艏摇、横摇的分频特性以及舵减横摇机理和基于 μ 综合的鲁棒控制器设计的技巧等。

第 6 章详细阐述了船舶航迹/航向神经网络控制,将免疫遗传神经网络和多元线性回归相结合获得船舶较为精确的数学模型辨识,为使航迹回归迅速,有效保持航迹、节约能耗提出了一种新的模糊神经网络航迹/航向控制器变性能指标训练方法。

第 7 章详细阐述了船舶舵/翼舵-鳍/翼鳍联合智能控制,这是作者提出并潜心研究十余年的成果,通过改变舵、鳍物理结构及翼型曲率,提高控制面的水动力性能,从执行器物理控制能力方面提升系统控制性能。该章涉及数据曲面拟合、遗传算法、能量方程建模等丰富内容。

第 8 章详细阐述了船舶航向及机炉协调支持向量机复合控制,通过提高在线运算速度和泛化能力,并采用鲁棒控制、模糊控制和支持向量机逆控制策略,设计出船舶航向鲁棒最小二乘支持向量机控制器和船舶机炉模糊支持向量机复合智能控制器,提高了大型船舶航向保持能力和船舶机炉控制的效果。

第 9 章阐述了船舶航向控制系统故障在线智能预报,该章对基于支持向量机的船舶航向控制系统故障在线预报方面需要解决的问题,进行了较为系统和深入的讨论,包括故障树、人工鱼群算法、人工免疫算法等诸多内容,给出了一些有创新意义的成果,对于提高船舶航向控制系统故障预报能力、丰富和发展故障预报技术、扩展支持向量机的应用领域,具有非常重要的意义。

第 10 章详细阐述了车载三轴稳定平台姿态控制问题,重点讨论了车载三轴稳定平台动力学建模方法、动力学特性分析与模型简化、可测干扰解耦控制和鲁棒输出跟踪控制等内容;设计了具有可调参数稳定平台姿态鲁棒输出跟踪控制系统,并基于反馈线性化方法,将可测干扰解耦研究结果与鲁棒输出跟踪研究结果相结合,形成了同时具有干扰解耦、输出跟踪和不确定性补偿的鲁棒控制策略。

第 11 章详细地阐述了船舶航迹/航向容错控制问题,主要研究了解析容错理论方法,包括基于 Lyapunov 的鲁棒容错控制器、模糊神经网络智能故障诊断、状态反馈重构和伪逆法重构,以及相关条件的推导证明等丰富内容。

以上章节内容在安排上力求完整性与独立性,读者可以根据需求选择阅读。

作者的研究得到了国家自然科学基金(60704004)、黑龙江省自然科学基金(A2004-19)、国家 973 项目(973-61334)以及部委基金项目(97J40. 2. 2)的资助;李高云博士撰写了本书的第 11 章,并对本书文稿处理做了大量的工作;邓志红、方亮、于萍、李冰、江娜、周丽明等博士为本书提供了有价值的素材;常绪成、贾云璐等

博士为本书图表的绘制做了大量工作;在此一同表示衷心的感谢。本书在撰写过程中,参考了许多学者指导的研究生学位论文及一些学者的论文、专著,作者借本书出版之机,向多年来与作者一同进行课题研究的同仁以及所指导的研究生们,向参考引用过他们文献的学者们致以诚挚的谢意!

由于作者的理论水平有限以及研究工作的局限性,特别是现代船舶控制工程自身技术也在不断地发展之中,书中错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者和专家学者批评指正。

作 者

2009年7月于哈尔滨

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 船舶控制工程概述	1
1.1.1 船舶横摇控制	1
1.1.2 船舶航向控制	2
1.1.3 船舶航向/横摇控制	3
1.1.4 船舶航迹/航向控制	5
1.1.5 船载三轴稳定平台姿态控制	5
1.2 现代控制理论概述	7
1.2.1 智能控制理论	7
1.2.2 鲁棒控制理论	13
1.2.3 抗饱和控制理论	16
1.2.4 容错控制理论	17
1.3 现代船舶控制工程概述.....	18
1.4 全书结构内容安排.....	20
第 2 章 船舶运动及海洋干扰建模	22
2.1 引言.....	22
2.2 参考坐标系.....	22
2.3 船舶六自由度运动建模.....	23
2.3.1 平移运动三方程	23
2.3.2 旋转运动三方程	24
2.3.3 空间六自由度一般方程	25
2.4 船舶运动模型简化.....	26
2.4.1 船舶四自由度耦合运动方程	26
2.4.2 船舶水平面运动线性化模型	26
2.4.3 方程右端诸项推导	27
2.5 船舶运动模型参数的计算.....	30
2.5.1 附加质量和附加惯性矩的估算	30
2.5.2 耦合运动模型黏性水动力系数的估算	31
2.5.3 线性模型黏性水动力系数的估算	32

2.5.4	船舶耦合运动模型水动力系数计算结果	33
2.5.5	船舶线性简化模型水动力系数计算结果	33
2.6	海洋干扰建模	34
2.6.1	海浪干扰建模	34
2.6.2	海风干扰建模	36
2.6.3	海流干扰建模	37
2.7	小结	37
第3章	船舶减摇鳍模糊控制	38
3.1	引言	38
3.2	基础知识	38
3.2.1	模糊控制理论的发展	38
3.2.2	模糊遗传算法优化理论	39
3.2.3	模糊控制理论基础	40
3.3	船舶减摇鳍遗传模糊 PID 复合控制	40
3.3.1	遗传模糊 PID 复合控制器结构	40
3.3.2	模糊控制器设计	41
3.3.3	遗传模糊优化控制器设计	46
3.3.4	遗传模糊 PID 复合控制器设计	55
3.4	船舶减摇鳍控制系统仿真研究	58
3.4.1	船舶减摇鳍 PID 控制仿真	58
3.4.2	船舶减摇鳍 GA-FC PID 复合控制仿真	62
3.4.3	船舶减摇鳍控制系统仿真分析	67
3.5	小结	70
第4章	船舶航向控制系统抗饱和控制	72
4.1	引言	72
4.2	基础知识	72
4.2.1	Lyapunov 稳定性	72
4.2.2	吸引域估计	73
4.2.3	L_2 增益	74
4.2.4	凸集分析	75
4.2.5	线性凸包法	76
4.2.6	LMI 与凸优化	77
4.3	抗饱和控制算法	79
4.3.1	问题描述	79
4.3.2	控制器设计	79

4.3.3	主要结果	82
4.3.4	LMI 优化求解	83
4.4	船舶航向保持静态抗饱和控制	84
4.4.1	船舶航向保持运动建模	84
4.4.2	舵驱动系统建模	85
4.4.3	船舶航向保持控制器设计	86
4.4.4	系统仿真	89
4.5	船舶航向转向抗饱和控制	94
4.5.1	船舶航向转向运动建模	94
4.5.2	船舶航向转向静态抗饱和控制	94
4.5.3	船舶航向转向饱和有限时间控制	98
4.5.4	系统仿真	101
4.6	小结	104
第 5 章	船舶航向/横摇鲁棒控制	105
5.1	引言	105
5.2	基础知识	105
5.2.1	参数摄动系统的线性分式表示	105
5.2.2	线性分式变换与参数摄动系统	106
5.2.3	简单函数参数摄动系统的线性分式表示	108
5.2.4	多项式函数参数摄动系统的线性分式表示	110
5.2.5	有理函数参数摄动系统的线性分式表示	118
5.3	船舶横摇 H_∞ 鲁棒控制	121
5.3.1	H_∞ 灵敏度极小化	122
5.3.2	船舶横摇减摇与 H_∞ 灵敏度极小化	123
5.3.3	控制器输出约束问题	124
5.3.4	船舶横摇减摇系统 H_∞ 鲁棒控制器设计	125
5.3.5	系统仿真	131
5.4	船舶航向 H_∞ 鲁棒控制	135
5.4.1	航向控制系统 H_∞ 鲁棒控制与 μ 综合	135
5.4.2	基于 μ 综合的航向控制系统 H_∞ 鲁棒控制器设计	144
5.4.3	系统仿真	152
5.5	船舶航向/横摇 H_∞ 鲁棒控制	167
5.5.1	航向/横摇联合控制原理	167
5.5.2	航向/横摇联合 H_∞ 控制的模型研究	170
5.5.3	基于 μ 综合的航向/横摇联合 H_∞ 鲁棒控制器设计	174

5.5.4	系统仿真	191
5.6	小结	210
第6章	船舶航迹/航向神经网络控制	212
6.1	引言	212
6.2	基础知识	212
6.2.1	神经网络研究进展	212
6.2.2	模糊神经网络的分类	214
6.2.3	神经网络与模糊逻辑融合	215
6.3	模糊神经网络控制器研究	217
6.3.1	模糊神经网络控制器的设计	217
6.3.2	模糊神经网络控制器的优化	218
6.4	免疫遗传模糊神经网络研究	219
6.4.1	遗传算法理论分析	219
6.4.2	免疫模糊遗传算法研究	230
6.5	船舶航迹/航向神经网络控制研究	237
6.5.1	船舶航迹/航向控制过程分析	237
6.5.2	船舶航迹/航向神经网络控制器结构设计	240
6.5.3	基于免疫模糊遗传算法的优化设计	242
6.5.4	船舶航迹/航向神经网络控制系统仿真	243
6.6	小结	250
第7章	船舶舵/翼舵-鳍/翼鳍联合智能控制	251
7.1	引言	251
7.2	舵/翼舵水动力特性建模	251
7.2.1	舵/翼舵水动力系数回归模型	252
7.2.2	回归模型参数估计	253
7.2.3	回归模型显著性检验	262
7.3	鳍/翼鳍水动力特性建模	264
7.3.1	鳍/翼鳍水动力系数回归模型	264
7.3.2	回归模型参数估计	264
7.3.3	回归模型显著性检验	272
7.4	系统驱动能量方程	272
7.4.1	舵/翼舵驱动能量方程建立	272
7.4.2	鳍/翼鳍驱动能量方程建立	274
7.5	舵角/翼舵角智能决策器	277
7.5.1	舵角/翼舵角分配规则研究	277

7.5.2	舵角/翼舵角分配规则的遗传算法实现	278
7.6	鳍角/翼鳍角智能决策器	283
7.6.1	鳍角/翼鳍角分配规则研究	284
7.6.2	鳍角/翼鳍角分配规则的遗传算法实现	284
7.7	航向/横摇-舵/翼舵-鳍/翼鳍联合鲁棒控制	286
7.7.1	基于 H_2/H_∞ 控制的航向/横摇鲁棒调节器研究	286
7.7.2	基于 μ 理论的航向/横摇鲁棒调节器研究	291
7.7.3	系统仿真	296
7.8	小结	303
第 8 章	船舶航向及机炉协调支持向量机复合控制	304
8.1	引言	304
8.2	基础知识	305
8.2.1	支持向量机基础知识	305
8.2.2	在线式支持向量机算法	308
8.2.3	支持向量机的参数选择	320
8.3	船舶航向鲁棒最小二乘支持向量机控制	329
8.3.1	鲁棒支持向量机控制器设计	329
8.3.2	船舶航向鲁棒最小二乘支持向量机控制系统仿真	333
8.4	船舶机炉支持向量机协调智能控制	342
8.4.1	支持向量机复合智能控制器设计	342
8.4.2	船舶机炉支持向量机协调智能控制系统仿真	346
8.5	小结	367
第 9 章	船舶航行控制系统故障在线智能预报	369
9.1	引言	369
9.2	基础知识	369
9.2.1	支持向量机回归算法	369
9.2.2	支持向量机回归算法预报能力分析	373
9.2.3	支持向量机回归算法在故障预报中的应用	376
9.3	船舶航行控制系统故障建模	379
9.3.1	船舶航行控制系统故障模式及原因分析	379
9.3.2	船舶航行控制系统故障树构建	381
9.3.3	船舶航行控制系统故障建模	390
9.4	故障预报并行优化技术研究	398
9.4.1	改进人工鱼群算法	398
9.4.2	优化模型的建立	404

9.5	支持向量机算法性能多目标优化研究	413
9.5.1	支持向量机算法性能评价指标	414
9.5.2	支持向量机算法性能的多目标优化	414
9.5.3	基于免疫鱼群算法的支持向量机算法性能多目标优化	422
9.6	船舶航行控制系统故障在线组合预报研究	429
9.6.1	组合预报的基本原理及方法	430
9.6.2	船舶航行控制系统故障组合预报模型建立	431
9.6.3	基于小波网络的组合预报模型中最优权系数的确定	434
9.6.4	船舶航行控制系统故障组合预报仿真	438
9.6.5	可视化船舶航行控制系统故障在线预报	452
9.7	小结	456
第 10 章	船载三轴稳定平台姿态控制	458
10.1	引言	458
10.2	基础知识	458
10.2.1	非线性系统理论基础	458
10.2.2	Lyapunov 稳定性理论	459
10.2.3	微分几何理论基础	460
10.2.4	干扰解耦问题	463
10.3	船载三轴稳定平台动力学建模研究	464
10.3.1	船载三轴稳定平台坐标系的定义与坐标变换	464
10.3.2	动量与动量矩定理	469
10.3.3	各框架旋转运动方程的建立	471
10.3.4	船载三轴稳定平台运动方程的展开形式	478
10.3.5	模型仿真研究	479
10.4	船载三轴稳定平台动力学特性分析与模型简化	482
10.4.1	三轴稳定平台动力学特性分析	482
10.4.2	模型简化研究	486
10.5	船载三轴稳定平台可测干扰解耦研究	496
10.5.1	多变量非线性系统的反馈线性化	496
10.5.2	非线性系统可量测干扰解耦	498
10.5.3	不确定非线性系统的鲁棒干扰解耦	503
10.5.4	船载三轴稳定平台可测干扰解耦	506
10.6	船载三轴稳定平台鲁棒输出跟踪控制	512
10.6.1	输出跟踪与参数化误差动态方程	513
10.6.2	具有可调参数的不确定非线性系统的鲁棒输出跟踪控制	514

10.6.3 船载三轴稳定平台鲁棒输出跟踪控制	519
10.7 小结	526
第 11 章 船舶航迹/航向解析容错控制	528
11.1 引言	528
11.2 基础知识	528
11.3 船舶航向控制系统故障描述	530
11.3.1 执行器类故障数学描述	531
11.3.2 传感器类故障数学描述	531
11.3.3 系统两类故障统一数学模型	532
11.4 鲁棒容错控制研究	532
11.4.1 基于 Lyapunov 的鲁棒容错控制研究	533
11.4.2 故障工况下船桨舵水动力系数分析	535
11.4.3 船舶故障工况下鲁棒容错控制器设计	548
11.5 重构容错控制研究	554
11.5.1 智能故障诊断技术研究	554
11.5.2 重构容错控制技术	564
11.5.3 传感器重构容错控制研究	565
11.5.4 执行器重构容错控制研究	574
11.6 船舶航迹/航向容错控制系统	580
11.6.1 分步容错控制策略思想	580
11.6.2 大型船舶航迹/航向容错控制系统研究	580
11.6.3 大型船舶航迹/航向智能容错控制系统仿真	581
11.6.4 仿真结果分析	586
11.7 小结	586
参考文献	587

第 1 章 绪 论

1.1 船舶控制工程概述

船舶在海上运行时,一方面,不可避免地要受到海风、海浪、海流的环境干扰,产生艏摇、横摇、横荡等六个自由度运动;另一方面,船舶需要执行各项任务必然会涉及诸多控制系统。因而,船舶控制工程涉及范围广泛,包括船舶航行与姿态控制、机炉控制、船载设备控制等众多领域。本书主要向读者阐述作者在船舶航向、横摇、航迹和船载三轴稳定平台、航向系统故障预报、航迹/航向容错控制等控制领域的研究成果。

1.1.1 船舶横摇控制

船舶航行时横摇阻尼很小,在风浪中会产生剧烈的横摇运动。船舶的横摇影响船舶的适航性,产生诸多不利影响。严重的横摇运动会使船上的设备不能正常工作,使船上货物受到损坏,甚至危及船舶的航行安全;横摇会使船员生活不适,降低船员的工作效率;对于军舰来说,横摇还会影响武器装备的使用,使舰载机不能安全起飞和降落。为了减小船舶横摇,人们一直在寻求减小船舶横摇的方法,并研制了许多控制船舶减摇的特种装置。减摇鳍是目前最为有效的减摇装置,它分为可收放式与不可收放式,如图 1.1 所示。

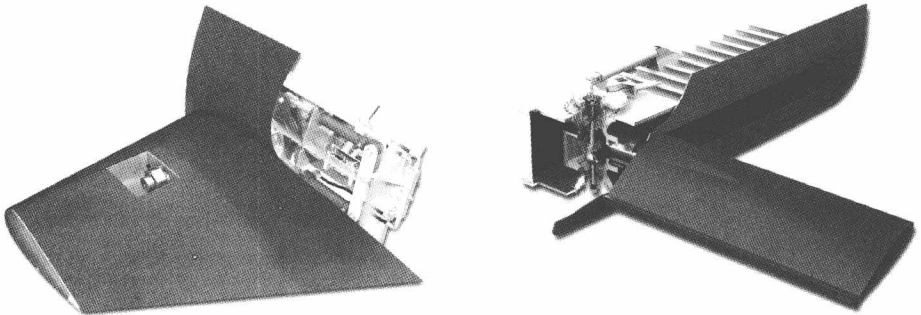


图 1.1 船舶不可收放式与收放式减摇鳍

减摇鳍的最早专利是 1889 年由 Thorneycroft 获得的。1923 年,日本的元良信太郎设计了第一套减摇鳍,经装船试验得到了良好的减摇效果(陈胜仲,1999)。

1935年,英国的布朗(Brown)兄弟公司设计的收放式减摇鳍成功地应用到2200吨的海峡渡轮Sark号上,从此减摇鳍得到了广泛的应用。1959年,第一套不可收放式减摇鳍被安装在HMS Devonshire船上,当今海军舰船上采用的多为不可收放式减摇鳍。Brown兄弟公司于1992年设计的VM系列减摇鳍被公认为是减摇鳍发展史上重要的里程碑。由于采用了新型材料,VM系列减摇鳍的轴直径小,承载能力更强,可减小浮力损失15%~30%,减小重量10%~20%,噪声降低10~25dB。VM系列减摇鳍在英国、日本、加拿大、西班牙、丹麦等国家的各种船舶上获得了成功的应用。国内对减摇鳍进行研究开始于20世纪60年代,哈尔滨工程大学在国内首次研制成功了船舶减摇鳍系统,研制的“NJ3”、“NJ4”、“NJ5”型减摇鳍已成功地应用到240多艘舰船上,取得了良好的减摇效果。目前,国内研制减摇鳍的单位主要还是哈尔滨工程大学和上海中船704所。

随着控制技术的不断发展,减摇鳍的控制方法也日益增多,几乎涉及了控制理论的各个研究方向。如Daniel研究了减摇鳍的神经网络控制方法;Gokcek等研究了考虑具有干扰模型不确定性的横摇减摇鳍的 H_2 性能;Haddara等研究了减摇鳍的自适应模糊控制方法。国内对减摇鳍控制方法的研究涉及模糊控制、神经网络控制、自适应控制、变结构控制、鲁棒控制等。这些研究在克服船舶减摇鳍系统中的不确定性、非线性及改善减摇效果等方面,取得了丰硕的成果。为了进一步提高减摇效果,哈尔滨工程大学的刘胜教授充分挖掘鳍的减摇能力,对鳍/翼鳍联合减横摇进行了研究,提出了翼鳍作为相对独立的控制面参与控制的方法。为了避免鳍角与升力映射关系的复杂性与不确定性,研究了船舶力控减摇鳍。研究表明,采用鳍/翼鳍联合减摇较常规整体鳍有更大的升力,升力反馈控制与鳍角反馈控制相比较,前者结构简单、鲁棒性强、减横摇效果更好,是船舶更为有效的减横摇方式。

1.1.2 船舶航向控制

为了保证船舶在海上安全航行并完成运输使命,必须对船舶航向加以控制。航向控制的任务主要由操舵来实现。最初,操舵工作是由舵手根据船舶运动特性及其积累的经验进行手动操舵。20世纪20年代,美国Sperry和德国Ansuzh在陀螺罗经研制工作中取得了实质性进展,1922年诞生了机械式比例自动舵,从此自动操舵仪得到了长足的发展,到1980年,几乎所有的船只上都安装了PID控制的自动舵。船舶单体舵和舵-翼舵的翼型如图1.2所示。

由于船舶航行状态及海洋环境复杂多变,经典的PID控制器在错综复杂的变化下难以保持良好的控制效果。20世纪70年代末,Oldernberg等最早提出了用直接推断法对PID自动舵的参数进行修正的自适应舵思想,此后,应用自适应控制理论设计的自动舵得到了迅速发展。美国的Sperry公司、日本的三菱重工业公

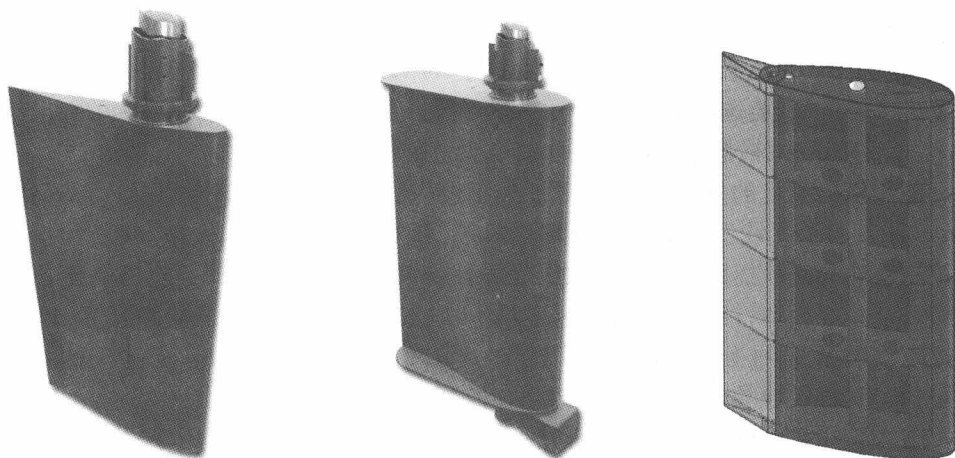


图 1.2 船舶单体舵和舵-翼舵

司、荷兰的 Obserbator 等公司都先后推出了各自的自适应舵。尽管自适应舵的控制精度远远优于 PID 舵,但由于自适应舵物理实现成本高,参数调整难度大,特别是由于船舶运动的非线性、不确定性,其控制效果难以得到保证。自 20 世纪 80 年代起,随着智能控制技术的发展,运用智能控制技术设计自动舵引起了众多学者的关注,如 Amerongen、Sutton 等研究的基于模糊控制理论的自动舵, Burns 等设计的基于神经网络的自动舵,智能控制舵在船舶非线性、不确定运动控制方面要优于自适应舵。

国内对自动舵的研究开始于 20 世纪 70 年代,随后几年时间内,国产 PID 自动舵就已经投入实船使用。20 世纪 80 年代,人们开始了对自适应舵的研究,赵国良等研究了极点优化配置的自适应舵,张炎华等研究了船舶自动舵的鲁棒自适应控制。随着控制理论的发展,国内对自动舵控制方法的研究也日益丰富起来。马壮等提出了基于演化计算的自校正模糊控制自动舵,程启明等研究了神经网络控制技术在自动舵上的应用,贾欣乐等研究了船舶自动舵的 H_∞ 鲁棒控制方法,杨盐生研究了自动舵的变结构鲁棒控制方法,刘胜、丁玲玲、方亮等研究了舰船主舵/襟翼舵的广义预测联合控制方法。

1.1.3 船舶航向/横摇控制

舵减横摇技术是船舶艏摇/横摇联合控制的基础。1972 年, Cowley 和 Lambert 首次提出舵减横摇的设想,同年,舵作为横摇稳定装置在一艘商船上得到了成功应用。1974 年,美国泰勒舰船研究中心(DTNSRDC)开始了对军舰采用舵减横摇装置的可能性研究。1976 年和 1979 年,DTNSRDC 分别在两艘“HAM170N”舰上进行的舵减横摇海上试验获得了成功,减摇效果提高近 50%。1980 年, Baitis

对舵减横摇进行了实验研究,在手动控制保持航向的基础上叠加了舵减横摇控制信号,也取得了令人鼓舞的结果。此后,荷兰的 van Amerongen 和 van der Klugt、丹麦的 Blanke 和英国的 Katebi 等众多学者投入到了舵减横摇的研究中。20 世纪 80 年代后期,舵减横摇装置的研究取得了大量理论与海试成果。

舵减横摇技术的发展,奠定了船舶艏摇/横摇联合控制的基础。1981 年, Kallstrom 采用多变量线性二次型控制理论对舵、鳍实施综合控制,模拟实验表明,可在控制航向与减横摇两方面同时取得优异性能;法国的“戴高乐”号航母就装备了舵鳍联合减摇设备;针对美国海岸警卫队 901 级舰设计的舵/鳍联合减摇系统,其减摇率较艏摇、横摇独立控制时要高出 26%;1997 年,Roberts,Sharif 和 Sutton 使用了 H_{∞} 最优控制技术设计了舵/鳍联合控制系统。

国内一些学者也展开了大量研究。在舰船舵减横摇方面,缪国平、朱文蔚、费乃振等采用遥控自航船模对舵减横摇进行了实验研究,验证了舵减横摇的效果;朱文蔚、缪国平还通过仿真研究探讨了舵阻摇 PID 控制参数对舵减横摇性能的影响;沈建清等提出了舵减横摇加权阵自适应最优控制器;郑明辉等设计了舵减横摇模糊控制系统,仿真实验表明,定常风干扰情况下该系统可有效减小横倾角;罗凯等提出了以横摇角速度的符号为切换函数的舵减横摇滑动控制方法;刘胜等研究了舵减横摇的 H_{∞} 鲁棒控制方法。在舰船航向/横摇联合控制方面,金鸿章教授研究了具有积分信号的舵/鳍联合控制系统的最优设计;赵国良等采用卡尔曼滤波与最优控制技术设计了舵/鳍联合控制系统;刘胜教授采用干扰抑制的 H_{∞} 方法设计了非线性舵/鳍联合控制系统。其中图 1.3 为哈尔滨工程大学开发的舵/鳍联合控制视景仿真平台。



图 1.3 哈尔滨工程大学开发的舵/鳍联合控制视景仿真平台