

船舶运动响应建模 与简捷鲁棒控制

王立军 © 著



电子科技大学出版社

责任编辑：谭炜麟

船舶运动响应建模 与简捷鲁棒控制



ISBN 978-7-5647-5087-9

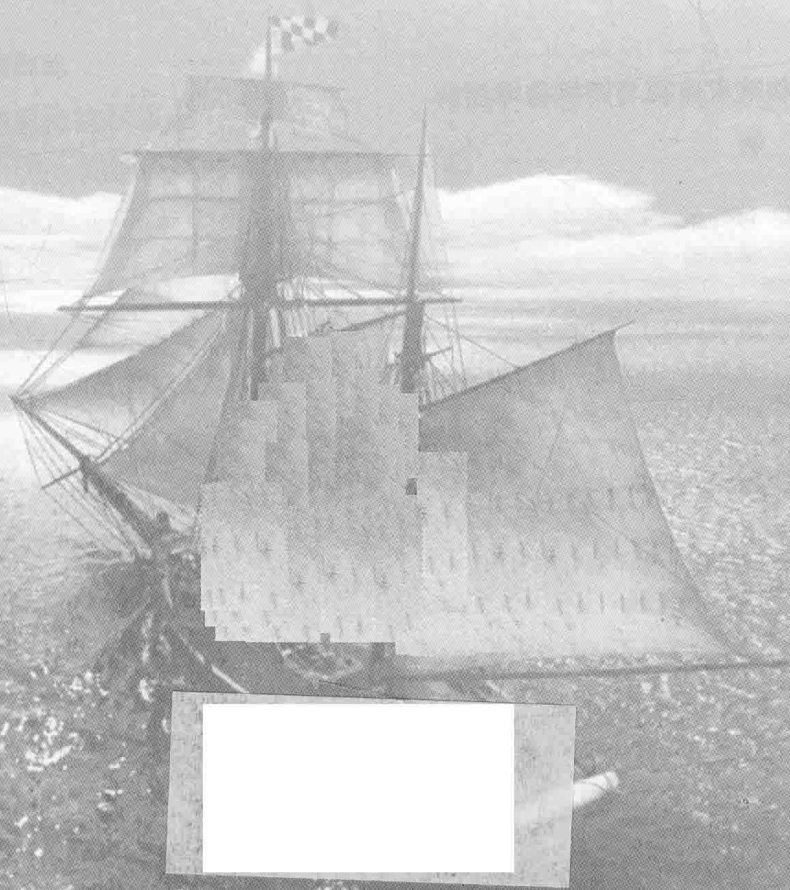


9 787564 750879

定价：58.00元

船舶运动响应 建模与简捷鲁棒控制

王立军 著



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

船舶运动响应建模与简捷鲁棒控制 / 王立军著. --
成都: 电子科技大学出版社, 2017.9
ISBN 978-7-5647-5087-9

I. ①船… II. ①王… III. ①船舶运动—鲁棒控制
IV. ①U661.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第222267号

船舶运动响应建模与简捷鲁棒控制

王立军 著

策划编辑 谭炜麟

责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 成都新千年印制有限公司

成品尺寸 185mm×260mm

印 张 8.75

字 数 186千字

版 次 2017年9月第一版

印 次 2017年9月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5087-9

定 价 58.00元

版权所有, 侵权必究



目 录



第 1 章 绪论	1
1.1 本书的研究目的及意义	3
1.2 船舶减摇航迹舵的研究现状	7
1.3 船舶运动响应建模的研究现状	13
1.4 简捷鲁棒控制的研究现状	14
1.5 本书的主要内容	16
第 2 章 基础理论	19
2.1 简捷鲁棒控制理论	21
2.2 基于 T-S 模糊模型的模糊综合理论基础	33
2.3 遗传算法	39
2.4 本章小结	48
第 3 章 响应型船舶运动数学模型	49
3.1 船舶平面运动的运动学	53
3.2 船舶平面运动的线性化数学模型	58
3.3 船舶平面运动的一种简洁非线性数学模型	67
3.4 操舵伺服系统的数学模型	75
3.5 非线性船舶运动数学模型	78
3.6 首摇与横摇的耦合运动仿真分析	84
3.7 响应型船舶运动数学模型	91
3.8 响应型船舶运动模型的建模与 GA 辨识	93
3.9 本章小结	99
第 4 章 船舶运动的简捷鲁棒控制算法研究	101
4.1 变论域自适应模糊 PID 混合控制自动舵设计	103

4.2 基于鲁棒模糊控制的船舶转向及航向保持	111
4.3 闭环增益成形算法的改进及其在减摇自动舵中的应用	119
4.4 基于闭环增益成形的船舶舵机间隙非线性抑制算法	128
4.5 本章小结	135



第 1 章

绪论

1.1 本书的研究目的及意义

21世纪是崭新的海洋世纪,世界各国都十分重视海洋经济发展。党的十八大报告明确提出海洋强国战略,指出海洋强国是科学发展的重要途径。而船舶作为主要运输载体广泛应用于开发海洋、利用海洋、保护海洋、管控海洋等各个方面。船舶的航行安全日益引起了人们的重视。

船舶在充满变数的大海上航行时,海事事故屡有发生,其中以船舶在恶劣海况下产生激烈横摇导致船舶海损甚至倾覆沉没为最多,通常会造成巨大的财产损失和严重的人员伤亡。2012年7月25日,“海洋石油699”三用工作船,在香港以东海域航行时遭受8号台风“韦森特”袭击,失去动力,船舱进水后船体倾斜,经多方施救无效后沉没,直接经济损失超过3亿人民币。再如2013年3月18日,天津籍集装箱船“光阳新港”轮从天津驶往浙江台州途中,在渤海湾中部龙口港北约40海里处遇大风,剧烈摇荡致使稳性丧失,导致船舶沉没,船上14名船员落水,其中12名船员遇难,另2人失踪。根据中华人民共和国海事局的事故统计,平均每年发生的航行事故达800余起,因此提高船舶运动控制技术对于保证海上交通运输安全具有十分显著的现实意义。

上述船舶倾覆事件的原因无不与恶劣海况中的剧烈横摇有关,剧烈的横摇不但严重影响船舶的航行安全,还对船舶适航性、船上设备运行与维护、货物的绑扎固定以及乘员舒适性都有较大的影响。例如,对于军舰来讲,剧烈的横摇会导致舰载飞机的起降失败,还会影响武器的命中率;对于舷墙较高的集装箱船,将面临着横摇过大导致丢箱甚至稳性丧失的风险。因此,船舶减摇控制成为船舶运动控制的一个重要研究领域。为了减小船舶横摇造成的不良影响,至今已经出现了各种各样的减摇装置,如:舳龙骨、减摇鳍、减摇水舱、减摇舵等,其中舳龙骨已经成为船舶结构中不可或缺的部分,但是其减摇效果是有限的,而减摇鳍的效果相比之下是最好的,也获得了比较广泛的应用,但减摇鳍一方面需要较高的安装费用和较大的安装空间,同时在船舶航行过程中会产生较大的拖曳噪音,对于军舰来说这是非常不利的。而舵减摇控制系统则不存在占用空间大和拖拽噪声的问题,在不增加控制输入和小幅度增加控制成本的前提下,实现航向和舵减摇的协同控制,进而增强船舶抗风浪能力,这是典型的欠驱动船舶运动控制问题。

欠驱动船舶的运动控制问题是当前亟待攻克的研究课题。由于海上航行的

大多数船舶只装备螺旋桨主推进器和舵装置，当需要依靠螺旋桨的纵向推进力和舵的转船力矩这两个控制输入量，同时控制船舶水平面位置和艏摇角 3 个自由度的运动时，船舶控制系统便属于欠驱动系统，航迹跟踪控制是这一领域的主流研究方向，即指在控制系统的驱动下，船舶从任意初始位置驶入预先规划好的航线，并沿此航线保持几何位置的精确跟踪。然而船舶在强烈的外界海况干扰下，将会出现大幅度的摇荡运动，其中横摇对于船舶的影响较为显著，因此，在不增加控制变量的前提下，研究航迹和舵减摇的四自由度协同控制，对于航迹舵的研发和提高船舶营运安全具有重要意义。

与此同时，由于船舶运动系统固有的大惯性、大时滞和非线性特点，航行工况的变化必然会引起模型参数甚至结构的摄动，这就是令研究者甚感棘手的不确定性问题。因此，船舶运动控制器的设计必须要考虑在模型摄动的情况下具有良好的鲁棒性和适应性。目前已经提出的舵减摇控制算法研究中，主要存在两个问题：一方面，控制算法本身十分的复杂，设计参数的物理意义具有较大的任意性；另一方面，控制器对不同海况的适应性方面考虑明显欠缺。本书在上述思路与闭环增益成形算法（Closed-loop Gain Shaping, CGS）的基础上，提出一种简捷舵减摇控制算法，研究结果显示：舵减摇控制器设计方法较目前的其他算法具有明显的简捷性；设计参数物理意义明显，海浪干扰周期和衰减因子分别与海况干扰和控制性能指标直接相关，可以直接进行控制器参数的优化；在模型不降阶的情况下进行控制器设计，其航迹保持控制环和舵减摇是频域自解耦的，无需另外设计滤波器；减摇效果较好，施舵合理，并在一定的海浪干扰频带内具有较强的鲁棒性和稳定性；算法对于稳定与非稳定过程的控制器设计均是适用的。

闭环增益成形算法是 H_{∞} 鲁棒控制理论的一种工程应用简化，根据闭环系统传递函数 T 的最大奇异值、带宽频率、关门斜率和闭环频谱峰值 4 个参数直接构造出鲁棒控制器。该算法的优点是设计过程简捷、参数物理意义明显并且具有良好的控制性能和鲁棒稳定性。

航向保持控制是控制理论应用较早且取得较好成果的一个领域。但是，由于船舶运动的复杂性，以及受到的外界干扰是随机的和难以预测的，现有控制算法并没有能彻底解决船舶航向的控制问题。近年来，随着计算机技术和现代化控制理论不断发展，各种新的控制算法，如神经网络控制、变结构控制、 H_{∞} 鲁棒控制、广义预测控制等算法，都先后应用于船舶航向保持控制。但是上述研究在解决船舶运动模型摄动和外界干扰时变的问题时，通常只选择其一，

本书拟在对船舶运动响应型模型辨识的基础上对航向保持控制器进行参数适应性调整,并且基于航向保持控制精度和舵机能耗的双重性能指标最优为适应度函数,利用自适应遗传算法对航向保持控制器参数进行进一步的优化。在此基础上,引入航迹跟踪控制算法,实现航迹舵功能。

实现航向适应性控制的主要障碍是船舶运动模型的摄动和外界干扰的时变性。首先船舶在营运和航行过程中存在装卸货和上下补给等导致的吃水变化,以及不同的航速都会导致船舶模型发生摄动,若只用目前方法求得的船舶 Nomoto 模型进行控制器设计将很难满足航向保持控制动态性能和航向跟踪性能的要求。因此,在对船舶航向响应模型在线辨识的基础上实现航向保持控制器参数的适应性调整;船舶在海上航行时一定会受到风浪流的干扰,并且随着船舶航向和航速的变化以及海况的变化,外界风浪流对于船舶运动的影响具有时变性,如何准确的对此进行预报将决定船舶航向跟踪的精度和舵机的能耗状况。

目前船舶运动数学模型主要有 3 个分支:以 Abkowitz 为代表的整体型结构模型,日本拖曳水池协会(Japan Towing Tank Committee, JTTC)提出的分离型结构模型(Ship Maneuvering Mathematical Model Group, MMG),以及在船舶运动控制领域广泛应用的响应型模型。前两种模型能够描述船舶运动的多变量运动问题,同时对外界干扰的引入较为准确和直接,但是其建模复杂且难度较大;而响应型船舶运动模型由于其直接反映了船舶运动变量对舵角的响应规律,并可以直接用于控制器的设计,因而实际应用较广,但是目前研究的响应模型主要是首摇对舵运动的响应型模型,关于横摇对舵响应的响应运动建模研究较少。由于横摇与船舶的航行安全性和经济性密切相关,以及舵减摇技术的应用都说明建立包含横摇的响应型模型是十分必要的。线性响应模型的典型代表是 Nomoto 模型,本书拟在考虑横摇惯性横倾的基础上,进一步考虑船舶横摇运动的振荡特性和非最小相位特性(Non-minimum Phase, NMP),给出一种船舶横摇运动响应模型。

船舶首摇和横摇对舵的响应运动主要表现为:船舶动舵后,首先,由舵压力 F_a 和舵叶至船舶重心的垂直距离形成的倾斜力矩 M_i 使船舶产生向转舵一侧的内倾;然后,由舵压力 F_a 和舵叶至船舶重心的水平距离形成的转向力矩 M_o 使船舶产生转向运动;当船舶定常旋回时,离心力 F_c 所导致的外倾力矩 M_o 远大于 M_i ,从而使船舶出现较大幅度的稳定外倾。

因此,在 Nomoto 模型的基础上引入横摇对舵响应模型,构造出更加完善的响应型船舶运动模型才能准确的反映上述动态响应特性。进而建立了某海军多

功能运输船的响应型船舶运动数学模型,结果显示该模型具有以下特点:建模较简单,只需要船舶在静水中的对舵响应数据,即可建立响应型模型;模型包含3个典型环节:非最小相位的内倾、阻尼振荡性和惯性外倾,能够较为准确的描述横摇对舵响应运动;参数物理意义明显,能直接根据响应曲线的特征值估算;能以足够的精度逼近非线性水动力模型的横摇对舵响应运动;以传递函数形式描述,可以像 Nomoto 模型一样用于控制器的设计,直接设计舵减摇控制器。

基于闭环增益成形算法的航迹与舵减摇简捷鲁棒优化控制系统主要包括两个控制回路:舵减摇和航向保持控制。当船舶的静态或者动态特征发生变化时(如吃水增加或者航速减小等),船舶的模型结构和模型参数均产生扰动,固定参数控制器将难以保证航向和减摇控制效果。本书首先利用遗传算法辨识出非线性 RPMM(Roll Planar Motion Mechanism)船舶运动模型的等价响应模型(Responding Ship Model, RSM),然后基于闭环增益成形算法直接给出对应的航向保持控制器和舵减摇控制器。并在克服船舶模型扰动的基础上对船舶的航向和舵减摇控制器进行参数调整。为避免波浪引起的横摇与转向引起的横倾叠加导致更大幅度的横摇,当船舶进行转向操作时 RRS 控制器应该关闭,以避免产生横摇加剧的危险局面;为使船舶能够更加准确的在航路点转向,在距离转向点约船舶转向半径时提前转向,船舶转向半径的值一般可取船长的倍数。

总之,本书首先基于闭环增益成形算法分别设计了航向保持和舵减摇的简捷鲁棒控制器,其中舵减摇控制算法的设计具有典型的简捷鲁棒性和参数适应性,并且由于控制参数物理意义明显使控制器设计的信息对称性明显增强。与此同时,为解决航向保持和舵减摇控制中由模型扰动和干扰时变引起的不确定性问题,针对本文提出的简捷鲁棒控制器特点,提出通过响应模型的参数辨识和干扰运动下的性能优化,确定控制器的模型参数和干扰带宽参数,进一步提高了控制器的鲁棒性和适应性;针对减摇航迹保持控制中存在的多目标优化问题,即:航向保持控制和舵减摇控制中存在的相互制约性和舵机快速性能的限制性,应用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)提出了舵减摇与航向保持控制的鲁棒协同优化方法。预期研究结果能够阐释和解决船舶运动建模与自适应鲁棒控制领域的一些问题,尤其是在减摇航迹舵的研发方面具有明显而重要的借鉴意义。

1.2 船舶减摇航迹舵的研究现状

本书对于船舶运动响应建模和简捷鲁棒控制的研究对象是全功能自动舵控制系统,即具有减摇功能的航迹舵,因此下面将对减摇航迹舵的研究现状进行详细阐述。

随着科学技术的进步,人们对船舶减摇提出了越来越高的要求,减摇航迹舵是为了更好的发掘船舶本身的减摇能力而提出来的研究课题。减摇航迹舵并不是在原自动舵系统简单的叠加舵减摇功能,而是在充分考虑船舶横摇和艏摇运动耦合机制的前提下,从更深层面上对船舶运动控制进行再认识,是自动舵系统功能进一步丰富化和智能化的发展契机。

近年来,对于减摇航迹舵控制系统,国内外学者已经做了许多十分有益的研究工作,其中不仅有理论方面的研究,还有海上试验测试,下面分别对国内外学者在该领域做出的突出贡献进行分析介绍,并进而总结出未来该领域的发展趋势。

1. 减摇航迹保持控制的国外研究现状

早在1972年,荷兰学者 Van Gunsteren 利用1艘水上摩托艇上进行了舵减摇装置的试验,控制器算法只是采用简单的比例控制并取得43%的减摇率^[1]。同年, Cowley, Carley 和 Lambert 正式的提出舵减摇的控制方法,并分别进行了仿真测试和船模试验,平均减摇率是40%^[2,3]。1975年, Carley 首次对舵减摇的可行性进行了分析,在进一步确认舵减摇效果的同时认为舵机的快速性能对于减摇效果至关重要^[4]。同年, Lloyd 通过分析护卫舰试验数据建模仿真研究证明,在平静水域舵减摇效果同减摇鳍相当^[5]。与此同时,美国海军舰船研发中心开始着手为海军舰艇研究舵减摇,美国海岸警卫队认为减小船舶横摇对于提高直升机在舰船上安全起降性能具有十分重要意义,故在1975年提出舵减摇的联合研究计划。Baitis 发表了针对美海岸警卫队两种船型的舵减摇系统在1979年进行海上试验的报告^[6-7],并且在手动操舵进行航向保持的基础上叠加了舵减摇控制,在取得令人满意的操纵效果的同时进一步明确了减摇效果与波浪遭遇角和舵的速直接相关性,在横向受浪时减摇效果最好。

进入20世纪80年代后,对舵减摇研究感兴趣的国家和地区主要有荷兰、瑞典、丹麦和美国。荷兰皇家海军联合 Delft 大学于1981年开始共同研究舵减摇,其

中 Van Amerongen 与 Van derKlugt 进行了一系列相关研究,包括计算机仿真、船模以及实船试验。基于线性二次高斯(LQG, Linear Quadratic Gaussian)方法设计了舵减摇控制系统,但没有考虑舵机的非线性等局限^[8-9]。然后通过研究增益规划方法,利用自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)和自适应等方法来防止舵机出现饱和现象。随后的实船试验表明采用增益规划方法的实船效果低于期望值和仿真效果,并且舵机出现了饱和现象。说明自动增益控制对舵机命令的限制在一定程度上影响了闭环回路的稳定性和舵速相滞后问题。进而在1998年,挪威学者 Lauvdal 和 Fossen 将 AGC 进一步改进为时变增益衰减(TGR, Time-varying Gain Reduction),通过调整增益控制策略和时机,取得了更好减摇效果^[10]。自适应算法则通过调整 LQG 中的性能指标函数的权,用该方法设计的舵减摇控制器经海上试验表明,在船舶的自然横摇频率附近的减摇率达到65%左右,当频率远离船体自然横摇频率时的减摇率降低幅度较大。丹麦学者 Blanke 综合采用 LQG 与自动增益方法处理舵机非线性问题,在中等海况下减摇率是35%~60%^[11]。瑞典学者 Kallstrom 于1981年通过数值仿真研究证明了舵减摇在某些情况下比减摇鳍的减摇效果更好^[12]。瑞典船舶研究从1984年开始尝试研制 ROLL-NIX 舵减摇系统,并于上世纪90年代初开发出定型产品并投放市场^[13]。美国开发研制的模拟控制器安装于海岸警卫队 WECH Hamilton 级巡逻艇,实际减摇率为30%~40%,并与1987年开发出数字控制器,进一步利用经过改进的舵机伺服系统,使减摇效果大幅度提高,甚至达到70%的减摇水平。新研制的舵机进一步满足功率、结构载荷以及耐磨损等新的要求。美国已经在斯普鲁恩斯级上进行了成功的海上试验,并成功研制了在航母上采用的舵减摇装置。在1977年到1986年期间,美国的舵减摇主要用于巡逻艇,后来逐步安装到驱逐舰上,并取得较好的减摇率达40%^[1]。

进入上世纪90年代后,舵减摇控制系统的研究重点逐步转移到鲁棒控制与自适应控制。Blanke 和 Christensen 在1993年通过仿真试验发现同一控制系统对两艘姊妹船的控制效果差别很大,并正式提出影响舵减摇控制系统的主要问题之一是模型的不确定性^[14]。G.N. Roberts 也对舵减摇的响应模型控制问题以及在不同船舶上的适应性进行了十分有益的探讨^[15]。为了解决模型不确定问题,Stoustrup, Blanke, Yang 以及 Christensen 分别利用 H_{∞} 控制算法中的多目标灵敏度方法设计舵减摇控制系统,减摇效果良好^[16-18]。在他们的控制器设计中主要考虑了输出扰动,对于船舶运动模型的结构摄动和参数摄动则没有充分考虑,因此控制器的设计本身过于保守。为了进一步提高控制的鲁棒性,Blanke 在1996年提出结构化不确定性模型^[19]。Hearn 与 Blanke 基于定量反馈理论设计了多级

单输入单输出舵减摇控制系统,在一定程度上解决了定倾重心高度变化引起的船舶运动模型不确定性问题^[20]。Yang与Blanke针对船舶运动模型的结构不确定性问题,基于 μ 综合法设计了多输入单输出控制器,仿真试验效果良好^[21]。Lauvdal和Fossen利用滑模控制实现了非线性舵减摇控制^[22]。Oda和Sasaki在自回归模型的统计方法的基础上实现了舵减摇控制^[23]。之后的研究逐渐智能化,Tiano实现了神经网络方法在舵减摇上的应用^[24-25],Zacharias与Pfister则将模糊控制方法应用到舵减摇^[26],H. Oda等利用统计学改进多变量自回归舵减摇控制^[27]。

本世纪后,Blanke利用多模态控制方法设计了舵减摇控制器,通过人工切换不同波浪周期下的控制器,使舵减摇的有效频带明显放大^[28]。Perez等利用限制性模型预测控制(MPC, Model Predictive Control)一定程度上解决了舵机的非线性问题,当最大舵速设定为 $8^\circ/\text{s}$ 时,减摇率依然可以达到41%^[29]。Tzeng与Alarcin.F分别基于内模控制(IMC, Internal Model Control)实现了舵减摇,并采用改进增益方法防止舵机出现饱和^[30-32]。Lozowicka、Tiano以及Lozowicki研究了一种具有 ϵ -精度能进行舵减摇的航迹自动舵系统,该系统使风的干扰影响最小化,并且实现了高精度的航迹保持控制^[33]。Nicolau与Ceanga提出在航向保持控制兼具减摇的模糊分析控制器,实现减摇率15%^[34]。Nicolau在重点分析研究了舵机非线性伺服系统的最大舵角和舵速对航向和舵减摇控制的影响,提出了产生舵令时机的3个准则,对控制算法的设计具有重要意义^[35]。G.C. Goodwin等人对于舵减摇功能和自动舵的航向保持控制功能之间的性能折中进行了讨论^[36]。P. Crossland, Fuat Alarçin和K Klaka分别研究了舵减摇在军舰、渔船和小型舰艇上的性能^[37-39]。E.López等在前人的基础上将非线性模型线性化,使之更利于舵减摇控制器的设计^[40];Tanguy H.等和Ming-Chung Fang等分别利用PID进行了舵减摇控制并利用神经网络等方法进行多目标优化参数^[41];Chereau V.则在舵减摇控制中对于舵机的策略增益调节和差值方法进行了对比研究^[42];Roberts G.N.提出了一种并行多模型切换舵减摇控制^[43];近3年来,John F.等于2010年提出使用多径非线性动态补偿对舵减摇进行控制^[44, 45];P.Raspa等在2011年通过对输出灵敏度函数优化成形设计了舵减摇控制器^[32];Ali J.Koshkouei等则提出了舵减摇的多模切换控制方法^[46],Ming-Chung Fang提出基于滑模控制的航迹与舵减摇的组合控制^[47],并于2010年进一步将自适应神经网络优化PID控制引入到舵减摇控制^[48],并在2012年将该研究应用到航迹保持和舵减摇的共同控制中^[49];Tristan Perez和Thor I. Fossen在2012年分别对于近来的舵减摇进行了总结和点评^[50, 51]。

2. 目前已经面世的舵减摇产品

截至目前已经面世的舵减摇产品主要集中在几个发达国家, 其中 ROLL-NIX 舵减摇控制器是位于瑞典的 SSPA Maritime Consulting 公司从 1984 年着手开始开发设计的, 到 1990 年已经在数十艘不同类型的舰船上安装和使用^[52, 53], 如炮艇、海岸巡逻艇、布雷艇、后勤支援舰等。该系统中的自适应减摇调节器的控制目标是在舵速为 $3\sim 10^\circ/\text{s}$ 时舵减摇效果最好。当 Roll-Nix 安装在扫雷艇上时, 实际减摇率达到 60% 左右, 减摇效果较佳。

ROLL-NIX 采用了基于现代控制理论的自适应滤波器和调节器, 可适应海况和航速的变化。它的硬件有摩托罗拉 MC68000 微机、角速度陀螺、自动舵控制、ROLL-NIX 控制和电源控制器, 共组成两个部件: 主设备和控制单元。主设备约重 12 千克, 体积约为 $0.5\times 0.2\times 0.3$ 立方米。控制单元重约 13 千克, 体积约为 $0.2\times 0.1\times 0.1$ 立方米。可将它用于对现役舰船的原操舵装置进行改装, 也可用于新船建造, 只要 1 到 2 天就可以完成安装和调试。该装置利用微机对信号进行数字滤波, 提高了控制质量。它也兼有航向自适应操舵仪的功能, 在启用舵减摇时可任意选择用手舵和自动舵保持航向。当要求改变航向时, 减摇控制会自动脱开。待进入指定方位后马上又重新开始工作, ROLL-NIX 型舵减摇装置至 1990 年已生产了 60 余套, 安装在吨位从 160 吨~11000 吨级的各种客船、舰艇以及工作船和救生船上^[54]。

荷兰在舵减摇方面获得了十分丰富的研究成果。1981 年荷兰皇家海军向 DELFT 大学咨询能否用舵减摇替代减摇鳍。1982 年荷兰皇家海军、DELFT 大学和 Van Rietschoten & Houwens 公司联合用一年时间与 MARIN 研究所合作, 通过数学模拟计算、物理模拟试验、8 米长的遥控模型海上试验和实船试验, 证实了用舵来替代减摇鳍的功能是可行的, 明确了舵机和船型是影响减摇效果的关键因素。当时的试验是采用简单的固定增益控制仪, 所以对不同的海况, 要有人工加以仔细调解。为此, 用了 3 年时间进一步解决舵减摇自动驾驶仪对海况、操纵系统(舵角、舵角速度)限制的自适应, 得到了许多有价值的成果, 研制成 ASSA 型舵减摇自动驾驶仪, 并按计划于 1990 年 6 月底安装在 M 级护卫舰的首制舰上。装有 ASSA 的荷兰皇家海军 M 级护卫舰海试证明, ASSA 在恶劣海况下具有完全的可操作性, 减摇率达到 60%, 且航向保持控制性能仍然满足规范^[55]。逐渐发展为现在的 BVI 公司(Blohm + Voss Industries), 注册商标“SIMPLES-COMPACT”已经誉满全球, 其舵减摇产品采用的是旋叶式液压舵机, 动力强劲, 性能稳定可靠, 广泛应用于各式军舰, 并逐步扩展到滚装船、

科学考察船和客船。近年来的装备船舶如表 1.1^[56]。由表 1.1 可知, 该系列减摇舵产品应用的船舶主要是军舰, 应用的舰船吨位逐年变大, 并且大多数舰船配备的是双舵机系统。

表 1.1 BVI 公司的舵减摇产品的应用统计

Tab.1.1 The application statistics of rudder roll stabilization systems produced by BVI

合约时间	船舶所属	船舶类型	船舶数量	舵机数
1999 - 2002	荷兰皇家海军	LCF 级护卫舰	4 艘	双舵
1999 - 2002	德国海军	F124 护卫舰	3 艘	单舵
2005 - 2006	德国海军	K130 轻型巡洋舰	5 艘	双舵
2006 - 2010	韩国海军	KDXIII 驱逐舰	3 艘	双舵
2010 - 至今	韩国海军	Ulsan-I 型护卫舰	6 艘	双舵
2012 - 至今	韩国海军	LST-II 型坦克登陆舰	3 艘	双舵

3. 减摇航迹保持控制的国内研究现状

国内舵减摇研究起步晚于西方发达国家。缪国平等人在 1982 年对舵减摇的可行性进行了研究^[57]。朱文蔚和缪国平利用 PID 控制方法仿真验证了舵减摇的可行性以及舵减摇效果受舵机性能的直接影响^[58, 59]。胡启庸等进行了船模试验和实船试验, 结果表明采用 PID 控制算法, 在转舵速度限定为 $10^\circ/\text{s}$ 的条件下, 减摇率仍可达到 50% 及以上^[60]。费乃振也是利用 PID 算法控制遥控自航船模在横浪条件下进行舵减摇试验, 结论显示航速对于减摇效果影响较大和高速舰船舵减摇效果显著^[61]。沈建清、赖延辉等将自适应控制应用于舵减摇控制, 结果表明具有一定的减摇效果^[62]。郑明辉等研究了模糊控制在舵减摇方面的应用, 在定常风的情况下验证了控制器的有效性^[63]。孔金彪等用最优化控制设计了舵减摇控制系统^[64]。罗凯、李俊等研究舵减摇的滑模控制^[65]。陈建平、朱越健等提出通过改造舵机进而提高转舵速度来改善减摇效果^[66]。杨盐生等学者将模型参考自适应控制应用到舵减摇^[67]; 李铁山等则研究了航迹的鲁棒自适应控制^[68];

上述研究中, 大多数并没有考虑船舶运动模型的不确定性问题, 这很容易导致仿真实验效果明显好于实船试验的现象。后来学者杨承恩在考虑模型不确定性的前提下, 利用鲁棒控制算法设计了 4 种舵减摇控制器^[52, 69-73], 后续鲁棒研究进一步复杂化^[74-82], 仿真研究结果表明, 在获得满意减摇率的同时系统具有较好的鲁棒性, 由于没有明确船舶运动模型结构, 使得控制器设计中具有较