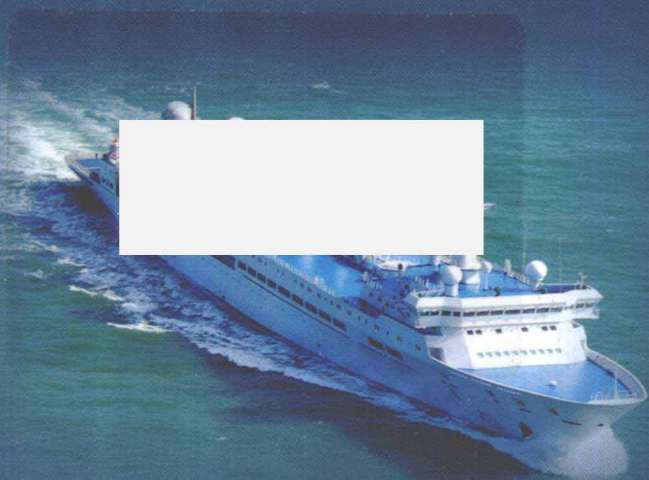


船舶运动简捷鲁棒控制

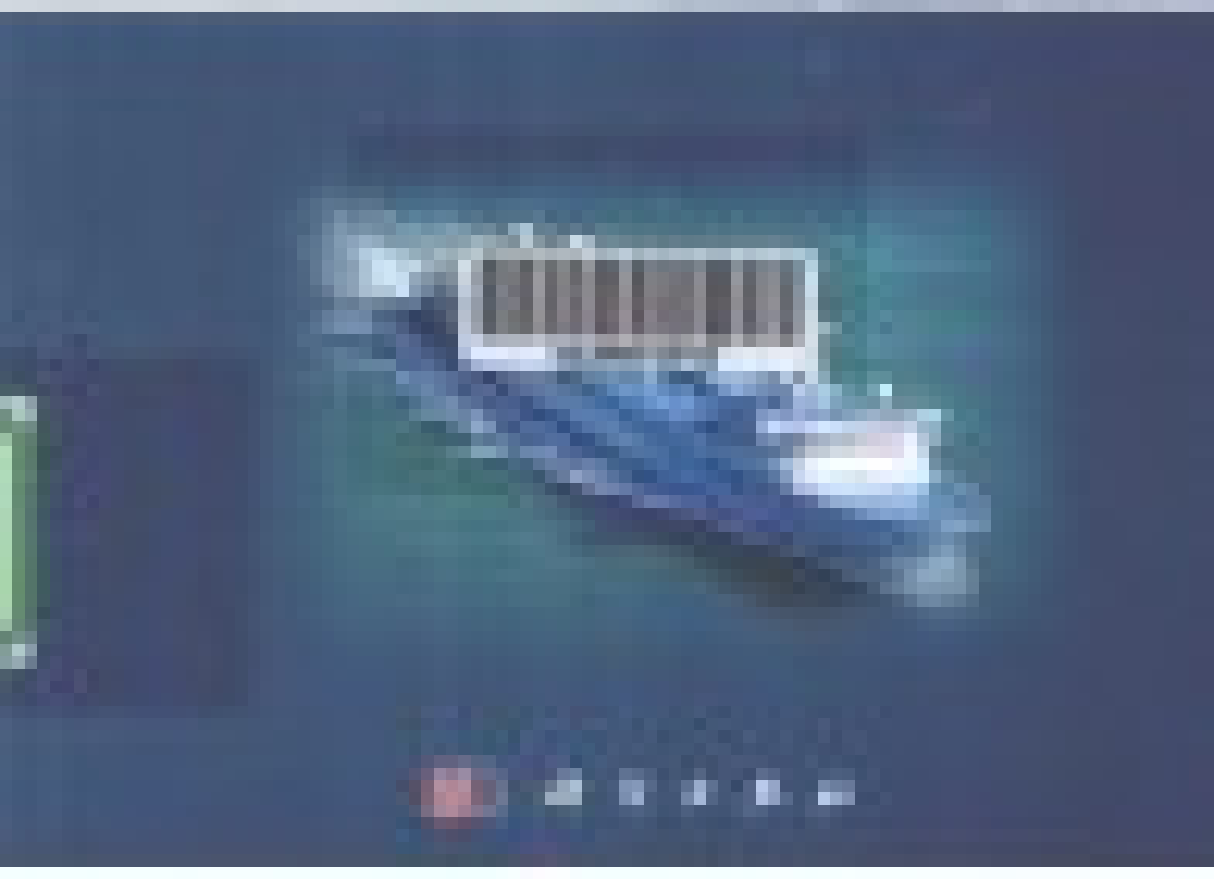
张显库 © 著



科学出版社

船舶运动简捷鲁棒控制

张淑华 孙 雷



船舶运动简捷鲁棒控制

张显库 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地总结了近 14 年来作者提出的简捷鲁棒控制算法应用于船舶运动控制领域所取得的主要成果,其严谨的论述利于有兴趣的读者尽快地触及学科的前沿问题。书中融入了作者对船舶运动控制科学的一系列思考所得和研究设计范例,有利于读者应用时参考。全书共 6 章,内容包括:绪论,船舶运动数学模型,线性系统的简捷鲁棒控制,神经网络简捷鲁棒控制,非线性系统的简捷鲁棒控制,简捷鲁棒控制在航海模拟器中的应用。

本书可供航海科学与技术、交通信息工程及控制、轮机工程、船舶自动化、船舶设计与制造、控制工程专业的研究生和高年级本科生阅读参考,对船舶运动控制器研究和设计人员有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

船舶运动简捷鲁棒控制/张显库著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-033499-2

I. ①船… II. ①张… 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(2012)第 018755 号

责任编辑:张艳芬 / 责任校对:张小霞
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 2 月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:222 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

船舶运动控制是一个重要的研究领域,其最终目的是提高船舶自动化、智能化水平,保证航行的安全性、经济性、舒适性。

近 15 年来,控制论的全面繁荣为船舶运动控制系统设计提供了诸多的控制算法,特别是神经网络控制、模糊控制、混合智能控制(统称为智能控制)、 H_{∞} 鲁棒控制和非线性控制等理论都被不同程度地引入该领域,为船舶运动控制科学的发展注入了活力,但这些算法的共同特点是算法复杂,要求艰深的数学基础。

孟子说:“广博地学习,详细地解说,最终还是要回到简略地陈述大义的境界。”控制界一直以稳定、准确和快速(稳、准、快)为三大控制目标,而在控制的实践中人们发现节能、经济和算法简单同样重要,可能是当今控制发展阶段中更注重追求的目标,故作者将控制的三个目标发展成六个目标,概括起来为六个字,即稳、准、快、节、经、简。将这六个字落实到船舶运动控制领域,即是国际海事组织(IMO)于 2010 年新提出的航海所追求的目标:“清洁海洋上安全、保安和高效的航运”,清洁海洋体现了经济;安全、保安体现了稳定;高效的航运体现了准确、快速、节能、算法简单。算法简单这一要求在当今为了发表论文使算法越来越复杂的大背景下显得格外珍贵,作者一直在思考,在船舶运动控制领域,能否利用自己的知识背景,结合船舶运动控制实践,将复杂的理论简化,使之易于理解和应用。作者坚信,简单方有效、顺势才迅捷。基于此,本书的作者努力了 10 多年,从最开始的只适用于单输入单输出(SISO)系统到证明其特例情况即为 PID 算法,再到不稳定系统、离散系统、大惯性系统、多输入多输出(MIMO)系统、非方阵系统、多时滞非方阵系统、与神经网络控制结合、与精确反馈线性化结合的非线性系统、与 Backstepping 结合的非线性系统、MIMO 非线性系统、本质非线性系统等,逐渐地已经积累了 50 余篇以“闭环增益成形”为关键词发表的学术论文,这里也部分地融入了作者的研究生的智慧。本书系统地总结了近 14 年来作者提出的简捷鲁棒控制算法(闭环增益成形算法)应用于船舶运动控制所取得的主要成果,为发展我国新一代的船舶导航及控制系统提供理论依据、算法和设计范例。闭环增益成形算法本质上是一种鲁棒控制算法,能保证在船舶动态具有不确定性、环境存在干扰、量测信息呈现不精确性(噪声)情况下,使闭环控制系统具有稳定性和良好的运行性能(具有鲁棒性能)。

当前,航海界在推动电子航海发展战略的过程中,注重强调了电子海图与信息显示系统(ECDIS),而实际上 ECDIS 的主要功能为航海信息的显示终端,相当于

人的眼睛,当然人的眼睛是非常重要的,但人的大脑更重要。而船舶运动控制在航海上的重要性与人的大脑功能类似,船上的各种通信系统相当于人的耳和口,螺旋桨、舵、减摇鳍等执行机构相当于人的手和脚,船舶运动控制器起着核心的控制作用。2011年3月,国际海事组织(IMO)船员培训和值班标准(STW)分委会在英国伦敦召开第42次会议,挪威代表首次提出将目前以航行为主的航海(航行模式)逐步变为以监控为主的航海(监控模式),这预示着要将当前以ECDIS为主导的(相当于眼睛)航海逐渐过渡为以船舶运动控制器为主导(相当于大脑)的航海,这将是航海界新的发展方向,航海也会因此逐渐由技术上升为科学,从而走向更安全、更清洁、更高效的航运。

本书是作者在多年从事该领域科研、教学基础上,参阅大量相关文献完成的。为了整本书的完整性,书中借鉴了作者前两部著作的相关内容,力求以比较形象的思维、简洁的语言论述复杂的事物,以便使本书更具可读性。

金一丞、王新屏、贾欣乐参加了本书部分内容的撰写工作,作者的研究生张国庆对书稿进行了校对及整理工作。感谢刘正江教授、石爱国教授和贾传荧教授在百忙之中审阅了本书初稿,并提出了宝贵的修改意见。

本书获得国家自然科学基金“船舶运动非线性简捷鲁棒控制”(50979009)、教育部博士学科点基金“船舶运动简捷鲁棒控制”(200801510002)和国家973计划子项目(2009CB320805)的资助,在此表示深切的谢意。

由于作者水平有限,书中的缺点错误在所难免,欢迎读者批评指教(zhangxk@dlmu.edu.cn)。

张显库

2011年11月于大连海事大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
参考文献	11
第 2 章 船舶运动数学模型	16
2.1 引言	16
2.2 船舶平面运动的线性化数学模型	17
2.2.1 船舶平面运动的非线性模型和线性模型	18
2.2.2 状态空间型船舶平面运动数学模型	21
2.2.3 传递函数型的船舶运动数学模型	22
2.3 响应型非线性船舶运动数学模型	23
2.3.1 响应型非线性数学模型描述	24
2.3.2 非线性表达式中参数的曲线拟合计算	25
2.3.3 响应型非线性船舶运动数学模型的验证	26
参考文献	26
第 3 章 线性系统的简捷鲁棒控制	29
3.1 SISO 系统的简捷鲁棒控制	29
3.1.1 准备知识	29
3.1.2 H_∞ 鲁棒控制理论简述	30
3.1.3 回路成形算法	34
3.1.4 SISO 系统闭环增益成形控制算法	35
3.1.5 船舶自动舵简捷鲁棒控制算法	37
3.2 简捷鲁棒控制的特例——PID 控制	40
3.2.1 张氏模型及 PID 参数求取	40
3.2.2 鲁棒 PID 控制在水箱液位控制中的应用	41
3.2.3 鲁棒 PID 控制与最优 PID 控制的比较	43
3.2.4 鲁棒 PID 控制与 H_∞ 控制的比较	44
3.3 简捷鲁棒控制的模型摄动	45
3.4 不稳定系统的简捷鲁棒控制	46
3.4.1 一般不稳定过程的简捷鲁棒控制	46
3.4.2 用镜像映射方法求纯不稳定过程的鲁棒控制器	48

3.4.3 具有对偶极点的不稳定过程的鲁棒控制	51
3.4.4 具有对偶零极点的不稳定系统控制器设计	55
3.5 基于信息对称的简捷鲁棒控制	65
3.5.1 信息对称理论	66
3.5.2 基于闭环增益成形算法的简捷控制	67
3.5.3 改进舵机执行机构增加信息传递量	68
3.6 离散系统的简捷鲁棒控制	71
3.6.1 离散型闭环增益成形算法	72
3.6.2 船舶航向保持离散数学模型	74
3.7 大惯性系统简捷鲁棒控制算法改进	76
3.7.1 改进的船舶简捷鲁棒控制算法	76
3.7.2 仿真结果分析	78
3.8 MIMO 系统的简捷鲁棒控制	79
3.9 非方阵系统的简捷鲁棒控制	84
3.10 多时滞非方阵系统的简捷鲁棒控制	88
3.10.1 多时滞非方阵系统的闭环增益成形算法	88
3.10.2 仿真实例	89
3.11 简捷鲁棒控制的非脆弱性	92
3.11.1 问题描述及准备知识	93
3.11.2 鲁棒 PID 参数设计及非脆弱性验证	93
参考文献	96
第 4 章 神经网络简捷鲁棒控制	100
4.1 基于监督控制的简捷鲁棒控制	100
4.1.1 鲁棒神经网络系统	100
4.1.2 响应型非线性船舶运动数学模型	101
4.1.3 仿真结果	102
4.2 基于直接控制的简捷鲁棒控制	105
4.2.1 鲁棒神经网络控制器设计	105
4.2.2 鲁棒控制器的实现及仿真结果	112
参考文献	116
第 5 章 非线性系统的简捷鲁棒控制	117
5.1 非线性 PID 算法	117
5.1.1 非线性控制理论发展概述	117
5.1.2 基于精确反馈线性化的船舶航向保持 PID 控制器	119
5.1.3 与闭环增益成形算法结合形成鲁棒 PID 控制器	121

5.1.4 由闭环增益成形算法构成的非线性鲁棒 PID 控制器	122
5.2 基于精确反馈线性化的简捷鲁棒控制	123
5.2.1 精确线性化的条件	123
5.2.2 基于状态反馈精确线性化法的非线性船舶自动舵设计	124
5.3 基于 Backstepping 的非线性控制	127
5.3.1 Lyapunov 理论	127
5.3.2 基于 Backstepping 方法的船舶运动航向保持控制	128
5.4 积分 Backstepping 的简捷鲁棒控制	133
5.4.1 积分 Backstepping 设计方法	133
5.4.2 积分 Backstepping 的船舶航向保持非线性鲁棒控制器设计	134
5.4.3 仿真结果分析	140
5.5 基于 Lyapunov 的简捷鲁棒控制	142
5.5.1 船舶航向保持的非线性简化控制算法	142
5.5.2 仿真实验	144
5.6 MIMO 非线性系统的简捷鲁棒控制	146
5.6.1 虚拟输出函数的简便求解方法	147
5.6.2 非线性舵鳍联合系统的状态反馈线性化	148
5.6.3 非线性舵鳍联合系统的控制器设计	151
5.6.4 仿真研究	152
5.7 具有非线性反馈的简捷鲁棒控制	154
5.7.1 正弦函数驱动的非线性反馈控制系统	155
5.7.2 仿真结果分析	157
参考文献	159
第 6 章 简捷鲁棒控制在航海模拟器中的应用	162
6.1 航海模拟器简介	162
6.2 简捷鲁棒控制在航海模拟器中的应用	163
6.2.1 航迹保持原理	163
6.2.2 航迹保持控制算法	164
6.2.3 系统的 VC 实现及结果	168
6.2.4 简捷鲁棒控制算法在航海模拟器中的应用	170
参考文献	176

第 1 章 绪 论

1. 现代航海离不开自动控制

2010 年,我国 GDP 为 40.1 万亿元,外贸的依存度为 65%。统计资料还显示,随着外贸依存度的逐年提高,海上运输在外贸中发挥的作用也在不断加强,海上运输周转量占外贸总量的比例已从 20 世纪 80 年代初的 82%增加到 2010 年的 95%。可以预见,海上运输在国民经济发展中所起的作用会越来越重要。

航海系指人类在海上利用船舶和海上结构物进行的各种航行和作业,其历史可追溯到远古“剡木为舟、剡木为楫”的时代,距今约有 7 000 年的历史。航海是人类认识、利用、开发海洋的基础和前提。不论是从事海洋捕捞和养殖,在海上从事旅客与货物运输,还是在海洋中开展国防和军事活动,对海洋进行科学考察,开发海底石油和矿藏等资源,从古到今,人类在海洋中的一切活动都离不开航海。

人类文明的发展离不开海洋与航海,而航海的发展离不开航海科学技术的进步。航海是由技艺、技能逐步发展成技术和科学的。航海科学与技术学科主要研究航海领域中的理论及关键技术,其最重要的标志就是船舶运动控制自动化水平的不断提高。从纵向说,航海首先要有符合技术和安全标准的高性能船舶和海上结构物,然后要保证航行和作业过程中的安全、准确、快速和节能,并防止海上事故发生,最后是一旦出现事故能实施有效的人命救助、环境救助(包括海洋环境和海洋生态)和财产救助,以尽可能减少损失;从横向说,航海主要有渔业航海、运输航海、军事航海和海洋科学考察航海,同时也包括开发海底油气和矿物资源的海上作业等。可以说 21 世纪世界已进入大航海时代,因此,对“大航海”应正确理解为不仅是指驾驶船舶或其他海洋运载工具从海洋或与海洋相通的一地到另一地的航行,而且还应包括航海作业以及一切为保障船舶顺利实现其航行目的的有关理论、技术、设施、管理制度和方法等硬件和软件系统^[1]。

水运是完成地区间、国与国间大宗货物贸易最有效、最经济的运输方式。海上行船充满了风浪雾礁等危险,如何科学地操纵和控制船舶,使之安全、准时地到达目的港,是一个性命攸关、影响重大的问题。为了掌握船舶运动规律和船舶驾控技术,人类已经奋斗了多个世纪,到今天已经取得了斐然的成就:船舶运动控制已从手动发展到自动,从单个系统的自动化提高到综合自动化,从简单的控制装置发展成为计算机化、网络化的体系结构;船舶运动控制已经形成一门独立的科学^[2,3]。

船舶日益大型化、高速化、专业化和现代化,随着电子、信息、自动化和网络技

术的发展,现代航海离不开自动控制^[4]。

2. 现代航海要求控制优良

船舶在海洋中的运动具有六个自由度,分解为前进、横漂、起伏三种平移运动及转艏、横摇、纵摇三种转动运动。在这种耦合运动中船和周围流体相互依存产生了关联惯性力,又相互作用产生了黏性力。外界环境的干扰包括风力、浪力及流力,其与船舶相互作用的机理很复杂;从效果上看,风引起类似随机游走过程的附加动力,浪造成船艏向及其他自由度上的附加高频振荡,流产生船位的运动学偏移。从运动控制角度看,桨、舵、锚是船舶在海洋中赖以工作和生存的三大主动操纵设备,它们提供船舶前进推动力、转船力矩和锚泊所需的抓力。为了减弱船在波浪中的横摇,20 世纪 60 年代制成了减摇鳍,作用原理类似于鱼类用鳍保持其身体的左右平衡。这表明船舶实际上是一个运行于不确定环境下的多输入多输出复杂动力学系统^[5],在各种气象、水文、航道等外部环境和不同装载、航速等内部条件下统一协调所有的控制设备,完成特定的航行和操作计划,是一项艰巨的任务,需要驾驶员具有丰富的经验和娴熟的技巧,同时要求自动控制系统具有优良的性能。

综上所述,船舶运动控制的特点可概括为“八个三”。

(1) 船舶具有桨、舵、锚三大主动操纵设备^[6],其中桨是最重要的,如果船具有双桨,可以没有舵,船舶转向可以靠双螺旋桨的配合来完成,如果船舶具有动力定位系统,那么理论上也可以没有锚。

(2) 船舶运动在海上受到风、浪、流三种海况干扰的影响,故其控制较为困难。

(3) 船舶运动可分解为附体坐标系的前进、横漂、起伏三种平移运动。

(4) 船舶运动还涉及附体坐标系的转艏、横摇、纵摇三种转动运动,与三种平移运动一起构成六个自由度的船舶运动。

(5) 船舶运动涉及不同的气象、水文、航道三种航行环境,异常复杂。

(6) 船舶运动存在着装载、航速、量测三种变化及不精确性。

(7) 船舶本身价值巨大,如果控制不好会造成海洋环境污染、生态灾难和货物损失巨大、人命伤亡巨大,即有三个巨大价值。

(8) 因此,船舶运动控制需要经验、技巧和科学,要求控制优良。

3. 现代航海对控制的要求

2010 年,《STCW 规则》中《海员培训、发证和值班规则》马尼拉修正案首次明确了其适任标准中规定的能力为以下七项职能^[7]:①航行;②货物装卸和积载;③船舶作业管理和船上人员管理;④船舶轮机;⑤电气、电子和控制工程;⑥维护和修理;⑦无线电通信。其中,控制工程是首次加入的,由此可见,船舶运动控制正逐渐被航运界所重视,航海也逐渐由技艺到技术最后上升为科学。

现代航海对控制的要求就是稳定、准确、快速、节能、经济且对海洋环境污染小、控制算法简单易用,可概括为六个字,即稳、准、快、节、经、简。

4. 船舶运动控制面临的难题和挑战

20 世纪下半叶,伴随整个科学技术的迅猛发展,船舶运动控制技术的进步日新月异。当今船舶运动控制理论和技术的发展面临的主要难题和挑战如下^[8]:

1) 船舶大型化

随着船舶大型化的进程,近年来航运业中出现了一大批超大型船舶。这类船舶包括 VLCC(very large crude carrier,载原油 20 万吨以上)、VLBC(very large bulk carrier,载矿石 20 万吨以上)、ULCC(ultra large crude carrier,超大型油船)、VLLC(very large LNG carrier,载液化天然气 20 万立方米以上)。

2009 年末,世界上拥有 20 万载重吨以上的大型油船(VLCC)430 余艘,其中包括三艘 50 万载重吨的超大型油船(ULCC)。目前最大的散货船为 36 万载重吨。集装箱船近年来也越来越大,原来 7 000TEU 和 8 000TEU 的集装箱船就算很大了,现在马士基 14 000TEU 的集装箱船已在运行。

2) 船舶专业化和货种的多样化

过去的海洋运输船舶主要是客船、散货船和油船。近 20 年来,集装箱船、滚装船、液化气船(LNG,LPG)等专业化特种船舶数量迅速增多。

化学工业、材料工业及制造业的发展使海上货物运输的货种发生了重大变化。据估计,常运的危险品有 7 000 种左右,常运的普通货物有 50 000 种左右。货物运输性质的研究、概括与总结对航运生产将有重大实用价值。

3) 船舶高速化

为了与高速公路、高速铁路运输竞争,近 20 年来,速度 30kn 以上的小型高速气垫船、水翼船、水动力船、喷气推进船快速研制并大量投入使用。当前的集装箱船速度为 25~30kn,比过去的普通货船快一倍。

4) 航海技术数字化

当前,传统的陆标定位、天文定位方法已成为特殊情况下的补充手段,无线电导航定位方法经过了无线电测向仪(1921)、雷达(1935)、罗兰 A(1943)、台卡(1944)、罗兰 C(1958)、卫星导航系统(1964)、全球定位系统(GPS)(1993)的发展历程,进入高精度卫星导航定位时代。美国开发的 GPS 可在全球范围内全天候为海上、陆上、空中和空间用户提供连续的、高精度的三维定位、速度和时间信息,使船舶、飞机和汽车等运载工具的导航与定位发生了划时代的变革。采取差分技术的 DGPS 技术可把定位精度提高到几十厘米。GPS 现已普遍装在船上,成为最主要、最常用、最简便、最准确的导航定位手段。为摆脱对美国 GPS 的依赖,俄罗斯开发了 GLONASS 全球导航系统,中国开发了北斗卫星定位系统,欧盟正在开发

伽利略卫星导航定位系统(中国参与了合作开发)。

传统航海资料的纸质印刷海图已不适应船舶自动化和航海智能化的发展要求,电子海图显示与信息系统(ECDIS)在近十几年研发成功并不断完善。该系统不但能很好地提供纸质印刷海图的有用信息,而且取代了传统的手工海图作业,综合了GPS、ARPA、AIS等各种现代化的导航设备所获得的信息,成为一种集成式的导航信息系统。ECDIS具有海图显示、计划航线设计、航路监视、危险事件报警、航行记录、海图自动改正等功能,大大提高了航行安全和效率,被称为是航海领域的一场技术革命。

航海所需的各种图书资料原都采用纸质印刷形式。随着计算机技术和互联网技术的发展,航海通告、潮汐表、灯标表等出现了电子版和网络版。海员可购买光盘或在网上查询和下载,这些都有利于航海图书资料中内容的迅速更新,避免了海员对纸质图书资料的手工更正,使用也更加方便。

5) 航海目的多样化

航海活动的目的主要有渔业、运输、军事和海洋科学考察,同时也包括开发海底油气和矿物资源的海上作业等。

21世纪被世界各国称为海洋世纪。国家海洋局宣布,我国将以完成7 000m载人潜器的研制为重点,大力发展深海探测技术体系,目前已经取得重要的阶段性成果。2011年8月,我国“蛟龙”号成功载人深潜5 188m,最大设计深潜为7 000m,将于2012年下半年进行相关试潜实验,如果成功,其海上作业的科学价值不亚于登月计划。

浩瀚的海洋,尤其是深海,正越来越受到我国海洋科技人员的关注。我国“十一五”大洋工作的主要目标就是以寻求和占有战略资源为核心,大力发展深海技术,持续开展深海勘查,适时建立深海产业,增强我国发现、圈定和开发深海资源的国际竞争力。深海作业离不开航海和船舶,船舶动力定位等技术是不可缺少的。

6) 船舶运动控制装置高精度化、网络化

船舶运动控制装置主要包括航向保持/改变自动舵、航迹保持自动舵、船舶减摇装置、船舶动力定位系统、船舶综合运动控制系统、水下潜器和综合船舶监控系统等,这些控制装置的发展趋势是由原来的好用走向高精度化,体现在每个系统或装置所使用的算法由简单走向复杂再走向简捷化,系统的实现也由单机逐渐走向网络化,采用多系统联合控制、多数据融合技术,从而在保证航行安全的基础上,取得高精度的控制指标,进一步实现准确、快速、经济、舒适、节能的目标。

5. 船舶运动控制的五类情况

船舶航行中,典型的手动控制为驾驶人员通过车钟手柄设定螺旋桨转速或主

机功率从而改变船舶前进或后退的速度;舵工转动舵轮设定舵角经液压操舵伺服系统驱动舵叶转动从而保持或改变航向、航迹。手动控制初看起来是一种开环控制,但如果把操作者也理解为控制系统的一个组成部分,那么这种控制系统实际上是闭环的。人的智能是任何自动化装置甚至“智能机器”所无法比拟的。在当前科学技术发展水平下,船舶操纵中一些最困难、最复杂的控制任务如避碰、靠离泊等还得依赖手动操作完成;而为了研制完成同样任务的自动控制装置如自动避碰系统、自动靠离泊控制器等,人的操作经验及由此获得的船舶运行数据是最宝贵的信息来源。即使目前已经实现了自动化的一些环节,如航向、航迹保持系统、航速控制系统,为了改进控制质量,提高经济效益,实现控制器的智能化并不断提高智能水平,把操作者作为教师来学习仍然是有效的手段之一。

船舶运动自动控制可概括为五类情况:①大洋航行自动导航问题,包括航向保持、转向控制、航迹保持、航速控制(到港时间控制)等;②港区航行及自动靠离泊问题,涉及船舶在浅水中的低速运动,风、浪、流干扰相对增大,系统信息量增多,操纵和控制更趋困难;③拥挤水道航行或大洋航行的自动避碰问题,主要涉及多船会遇、碰撞危险度评估、多目标决策、避碰最佳时机及最佳转向幅度预报等;④船舶减摇控制,主要包括鳍减摇控制、舵减摇控制和舵鳍联合减摇控制等;⑤无人航海载运工具的控制,主要包括无人水下机器人(UUV)的控制、遥控机器人(ROV)的控制、自主水下机器人(AUV)的控制、无人水面船舶(USV)的控制、无人半潜船舶(USSC)的控制等,文献[9]认为第五类船舶运动控制是本学科的发展新趋势。除上述五类典型船舶运动控制问题之外,还可列举出多种专门化的船舶运动控制问题,如船舶动力定位、快速船等特种船控制、船舶故障检测等。

6. 船舶自动操舵仪

船舶自动操舵仪(autopilot)又称自动舵,用于航向保持/航向改变/航迹保持控制^[10,11]。早在20世纪20年代已出现商品化的机械式PID自动舵用于商船的航向保持。在此后的历史进程中,随着科学的发展和工艺技术的进步,自动舵的构造变化巨大,电气式、电子式和微型计算机化的产品相继问世。20世纪90年代,GPS开始提供商业化定位服务,使航迹保持真正在自动舵中实现成为可能。

对比航迹保持而言,航向保持较为简单,后者只要求用舵角 δ 克服环境的干扰将航向 ψ 维持在设定航向 ψ_r 上,如图1.1所示。航向自动舵作为一种控制器其输出的控制舵角 δ 应该是航向误差 $\Delta\psi = \psi_r - \psi$ 和转舵角速度 r 的函数

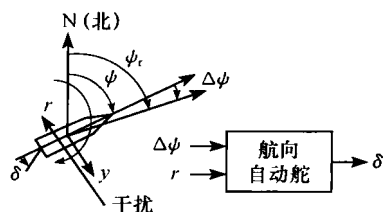


图 1.1 航向保持问题

$$\delta = f_1(\Delta\psi, r) \quad (1.1)$$

如果取 δ 与 $\Delta\psi$ 和 r 呈线性关系,就得到比例-微分(PD)舵,这是广泛应用的一种控制律,可初步满足通常情况下的航向保持要求。为了提高控制性能,必须引用各种先进的控制策略。

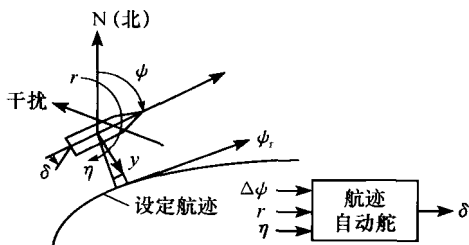


图 1.2 航迹保持问题

航迹保持要求用舵角 δ 克服环境干扰把船舶的运动轨迹维持在设定航迹上,这时不但要消除航迹误差 η ,而且要消除航向误差 $\Delta\psi = \psi_r - \psi$,其中 ψ_r 是设定航迹上与船位距离最近点的切线方向,如图 1.2 所示,航迹自动舵的输出舵角应该是 $\Delta\psi$ 、 r 及 η 的函数

$$\delta = f_2(\Delta\psi, r, \eta) \quad (1.2)$$

自动舵各种控制策略研究中最核心的问题在于寻求确定函数 f_1 和 f_2 的方法并得到这两个函数的最终结果。

船舶航迹保持可分为分离控制和综合控制两种方案。分离控制(间接式控制)方案把控制分成互相嵌套的 3 个环[见图 1.3(a)]:外环(航迹环)的功能是将 GPS 接收的船位数据与计划航线进行比较,获取航迹偏差信息 $\eta(k)$,通过航迹保持算法得到一个命令航向 $\psi_r(k)$ 给航向保持环,引导船舶向着消除航迹偏差的方向驶进;中环(航向保持环)将罗经采集的实际航向 $\psi(k)$ 与 $\psi_r(k)$ 比较形成航向误差信息 $\Delta\psi(k) = \psi_r(k) - \psi(k)$,经过航向保持算法得出一个命令舵角 $\delta_r(k)$ 给舵角控制环,使船舶向减少航向偏差的方向转动;内环(舵角控制环)则用于驱动舵机使舵角检测值 $\delta(k)$ 与舵令 $\delta_r(k)$ 一致,最终实现航迹保持。这种方案的传递关系是:从控制的起因上看,有 $\eta(k) \Rightarrow \Delta\psi(k) \Rightarrow \delta(k)$;从控制效果上看,则有 $\delta(k) \Rightarrow \Delta\psi(k) \rightarrow 0 \Rightarrow \eta(k) \rightarrow 0$,由舵角顺序地控制航向误差 $\Delta\psi(k)$ 和航迹误差 $\eta(k)$ 。航迹分离控制方案的优点在于航迹和航向保持功能的相对分离,不但便于这两种控制模式的相互转换,而且便于在自动舵系统设计中充分利用航向操舵仪成熟的技术与丰富的研究经验,利于在软硬件开发中采用模块化结构。总之,这种方案比较接近现阶段的航海实践,较易于为海员理解和接受;其缺点是控制精度略低。

综合控制(直接式控制)方案航迹舵用于对航迹进行高精度控制的场合,如海底电缆铺设、探矿和扫雷等,此时航迹保持器实际上是综合了分离控制方案中航迹保持与航向保持两部分的功能[见图 1.3(b)],它同时接受航线计划指令和由传感器送来的船位及航向反馈信号,输出舵角控制命令信号,同时达到 $\delta(k) \Rightarrow \eta(k) \rightarrow 0$ 和 $\Delta\psi(k) \rightarrow 0$ 的效果,故控制过程是单入双出的。其缺点是系统调试的难度增大,运行灵活性不足。

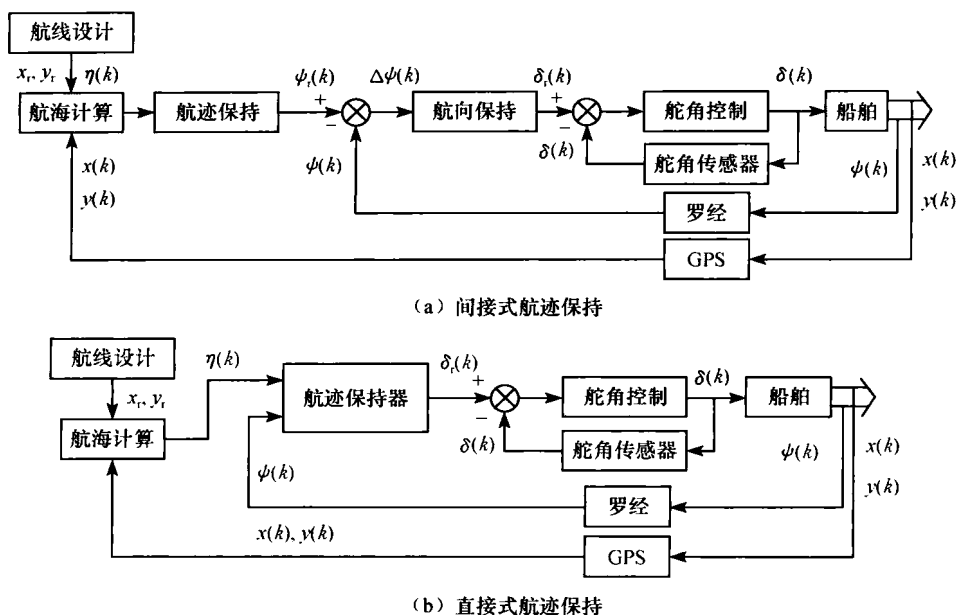


图 1.3 船舶航迹保持的两种方案

当前国际市场上,间接控制型航迹自动舵产品有东京计器公司的 PR-700、PR-800, Sperry 公司的 ADG3000VT、ADG6000 等,它们直接借用自适应航向自动舵的经验,配以航迹规划和导航计算功能,算法成熟,技术简单可靠,成为主流产品。直接控制型航迹自动舵产品主要有 Anschutz 公司的 NPA-W1,利用多变量最优控制和 Kalman 滤波技术,控制精度较高。我国目前尚无航迹自动舵定型产品^[12]。

7. 航行综合监视与控制

在船舶运动控制领域,先进的控制手段历来是为实现节能、减少船员定额和保证安全航行服务的。20 世纪 80 年代,节能和减少定员一度成为考虑的主要方面,目的是为了获取更高的营运利润。20 世纪 90 年代初,这种观念有了明显的更新和变化,航行安全突出地受到重视,原因有以下几个方面:其一,1992 年一年时间世界范围内接连出现一艘大型油船触礁和一艘 VLCC 碰撞的恶性事故,造成严重的海洋环境污染,事故起因主要是操作人员判断失误与操作不当;其二,一人驾驶台体制已成为现实,船员编制已可减到 6 人,在一位驾驶人员监视与操纵下船舶能随意航行于各海区和港口,经济性大幅度提高,保证此类船舶的航行安全,无疑至关重要。这些因素促进了先进的航行监视与控制系统的的发展,不妨将这类系统统称为综合驾驶台控制系统。

综合驾驶台控制系统的关键技术是通过微机局域网(LAN)将航海自动化子

系统、轮机自动化子系统、货物装卸自动化子系统甚至船舶营运管理子系统全部纳入一个统一的、层次更高的框架之内,由 LAN 存储、管理所有的重要信息和数据,并以适宜、鲜明、简洁的形式(文字、曲线、图形)将那些最关键的航海、轮机系统自动运行的信息提供给值班驾驶员,使他一目了然地把握全船动态,并将主要精力放在去注视航行海域环境的变化并执行某些必要的操纵,以达到真正的安全。可见,这种综合驾驶台控制系统实质上是面向操作人员的监视和操纵行为的,是在他们进行决策时能提供有效支持的系统。

综合驾驶台控制系统可举出如下一些实例:①丹麦 Lyngso-VAMLET Marine 公司的综合船舶控制系统;②英国 RACAL-DECCA 公司的 MIRANS 是一个综合性的航海和航行管理系统;③美国 Sperry 公司的 VMS 是一个以综合管理航海方面的导航与避碰操作为主的计算机局域网络系统,称之为 Sea-Net;④作者曾对综合船舶控制系统做过一些实验室研究,参见文献[13]、[14]。

8. 船舶运动控制研究的基本问题

船舶运动具有大惯性特点,万吨级油船的时间常数可达百秒以上,对动舵的响应缓慢,某些开环不稳定船舶甚至存在着对操舵的反常响应(在一定舵角界限内打右舵船头反而向左转),其控制更为困难;在操舵伺服子系统中存在着时滞和继电器特性等非线性因素,这是采用某些线性控制理论所设计的自动舵控制算法的效果与研究者的期望相差甚远的根本原因;航速变化和装载增减造成船舶质量、惯性矩、重心坐标发生变化,引起各种流体动力导数相应改变,最终导致船舶运动数学模型的参数甚至结构产生摄动(perturbation),这就是研究者甚感棘手的不确定性,上述在自动舵设计中被忽略的舵机伺服子系统的那部分非线性因素是不确定性的一个典型例子;风、浪、流的存在不仅如前所述会造成对船舶运动的附加干扰动力(风的低频干扰动力和浪的高频干扰动力),从实质上讲,这些干扰最终也转换成船舶运动模型的参数和结构的摄动,即干扰同样引起不确定性。在对船舶运动进行闭环控制时,获得反馈信息的量测手段也不可能是完善的,一些重要的量测数据如航向、船位等都有一定的误差,后者呈现为一种随机噪声,因而我们不得不对量测信息的不精确性。

一个控制器如果在被控过程处于标称条件(nominal condition)下(过程模型不存在不确定性、环境无干扰、量测无误差)使闭环控制系统稳定,则称该系统具有标称稳定性;如果此时闭环系统的动态性能也满足规定的要求(例如,满足关于动态误差、静态误差、最大超调量、上升时间和调节时间的要求,或满足关于综合反映这些指标的某种范数——如 H_{∞} 范数的要求),则称该系统具有标称性能。满足标称性能自然较满足标称稳定性要前进一步,但并不能真正解决实际问题,因为客观世界是复杂多变的,不存在没有不确定性、干扰、不精确性的被控过程及量测手段。