

船舶控制系统

张显库 著



NLIC 2970717653

大连海事大学出版社

船舶控制系统

张显库 著



NLIC 2970717653

大连海事大学出版社

©张显库 2010

图书在版编目 (CIP) 数据

船舶控制系统 / 张显库著. —大连: 大连海事大学出版社, 2010.11
ISBN 978-7-5632-2491-3

I. ①船… II. ①张… 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 221580 号



大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

2010 年 11 月第 1 版

2010 年 11 月第 1 次印刷

大连印刷三厂印装

大连海事大学出版社发行

幅面尺寸: 185 mm × 260 mm

印张: 12

字数: 287 千

印数: 1~500 册

责任编辑: 董玉洁

封面设计: 王 艳

版式设计: 冰 清

责任校对: 李继凯

ISBN 978-7-5632-2491-3

定价: 25.00 元

本书由

大 连 市 人 民 政 府
大连海事大学学术著作出版基金

资助出版

The published book is sponsored by

The Dalian Municipal Government
and
The Academic Works Publishing Foundation
of the Dalian Maritime University

前 言

船舶控制系统主要包括航向保持或航迹保持自动舵、船舶减摇系统、船舶动力定位系统、船舶综合运动控制系统和水下潜器等，涉及船舶运动控制领域的主要控制算法及控制系统，这些算法和系统最终目的都是保证船舶航行的安全性、经济性和舒适性。

近 20 年来，控制论的全面繁荣为船舶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到该领域，为船舶控制系统的发展注入了活力。2006 年笔者在国防工业出版社出版了专著《船舶运动控制》，该书系统地总结了这一期间内智能控制、鲁棒控制和非线性控制在船舶运动控制中的应用成果，为发展我国新一代的船舶导航及控制系统提供理论依据及算法和设计范例。本书在此基础上，更注重船舶控制系统的实现及理论与实践相结合，给出几种典型的船舶控制系统的设计和实现，形成了一部新的著作。

本书的内容包含了作者及其研究生的 20 余篇论文，还涉及作者的 1 名博士生及 3 名硕士生的学位论文的部分内容。全书共分 10 章，其中船舶航向保持控制系统、船舶自动舵设计、船舶横摇减摇装置、船舶横摇减摇系统设计、船舶动力定位系统、船舶综合运动控制和综合船舶监控系统等 7 章内容为新增的内容，其余 3 章为在原书内容基础上根据近 5 年相关研究的发展重新改写的。

本书能使读者掌握常用的船舶运动和船舶姿态控制的控制特点、系统的组成、系统的设计原则和设计方法、控制系统的分析和综合方法。学习此书后，可以承担船舶运动控制系统的科学研究和工程设计工作。

贾欣乐教授参加了本书部分内容的撰写工作。感谢大连海事大学金一丞教授、刘正江教授、贾传荧教授以及大连海洋大学校长姚杰教授在百忙之中审阅了本书，并提出了宝贵的修改意见。本书获得国家自然科学基金（50979009）和教育部博士学科点基金资助（200801510002），在此表示深切的谢意。

本书可供交通信息工程及控制、航海科学与技术和控制理论与控制工程专业类的本科生及研究生作为船舶运动控制课程的教材和参考书，还可供船舶运动控制研究和设计人员参考。

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

作 者

2010 年 10 月于大连海事大学

目 录

第 1 章 船舶运动控制及控制装置简介.....	1
第 2 章 船舶运动控制的特点.....	9
第 3 章 船舶航向保持控制系统.....	11
3.1 响应型非线性船舶运动数学模型.....	11
3.2 船舶进出港低速航向保持.....	15
3.3 船舶转向的鲁棒控制.....	20
3.4 关于 Nomoto 模型的进一步思考.....	25
3.5 用多元非线性回归分析方法预报船舶操纵性指数.....	29
3.6 基于船舶回转试验计算操纵性指数.....	35
3.7 大惯性船舶航向保持的改进简捷鲁棒控制.....	42
3.8 基于李雅普诺夫稳定性的船舶航向保持非线性简化控制.....	47
第 4 章 船舶自动舵设计.....	54
4.1 基于 PC/104 的船舶自动舵设计.....	54
4.2 鲁棒自动舵.....	62
4.3 基于 VB 编程的航迹保持显示.....	68
4.4 基于直接控制的鲁棒神经网络在船舶航向保持中的应用.....	77
第 5 章 船舶横摇减摇装置.....	91
5.1 引言.....	91
5.2 新型船舶减摇装置.....	92
5.3 基于船舶回转试验建立横摇响应型数学模型.....	93
5.4 船舶横摇运动中的混沌及其非线性简捷控制.....	96
第 6 章 船舶横摇减摇系统设计.....	105
6.1 船舶舵鳍联合减摇综述.....	105
6.2 船舶舵鳍联合减摇控制系统设计.....	110
第 7 章 船舶动力定位系统.....	118
7.1 引言.....	118
7.2 船舶动力定位系统的船级及传感器.....	118
7.3 船舶动力定位系统的数学模型.....	120
7.4 船舶动力定位系统的鲁棒控制器设计.....	122
第 8 章 船舶综合运动控制.....	129
8.1 SWATH 航向保持控制.....	129
8.2 水翼艇纵向运动多变量鲁棒控制.....	131
第 9 章 水下潜器的控制.....	136
9.1 自动生成的神经网络控制器及其在水下潜器中的应用.....	136

9.2 闭环增益成形算法应用于水下潜器研究.....	150
第10章 综合船舶监控系统.....	154
10.1 综合船舶监控系统设计.....	154
10.2 一种低成本的综合船舶监控系统.....	177
附录 本书出现的专业术语及其英文对照表.....	183

第 1 章 船舶运动控制及控制装置简介

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的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，最后是在一旦出现事故后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、准时到达目的港，是一个生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]。

船舶在海洋中的运动具有 6 个自由度，分解为前进、横漂、起伏 3 种平移及转艏、横摇、纵摇 3 种转动。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，浪造成船首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 3 大主动操纵设备，它们提供船舶前进推动力、转船的回转力矩和锚泊所需的抓力。为减弱船在波浪中的横摇，20 世纪 60 年代制成了防摇鳍，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，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个艰巨的任务，需要驾驶员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。

为了进行实际的研究必须确定船舶运动数学模型方程中诸多参数的量值,这主要靠船舶试验结果或采用系统辨识技术对实船操纵数据进行回归从而得到最佳参数估计。通过计算机仿真可以对各种环境条件及操作方式下的船舶动力学行为进行深入的研讨。在此基础上再配以视景系统,通过计算机生成动态图像方法把环境场景和本船立体图像投影到大屏幕上就能制成船舶操纵模拟器。目前国际上有十余座性能先进的船舶操纵模拟器在运行,包括荷兰海事研究所、挪威 Trondheim、美国 Kings Point 以及德国 Maritime Simulator Center 的模拟器;最近在“211 工程”推动下大连海事大学制成了具有三维动态图像的船舶操纵模拟器^[2-6],并已实现产品化并出口到新加坡。船舶操纵模拟器不但可进行船员培训,而且还可完成船舶操纵特性研究、港湾建筑及河道疏浚咨询研究、大型船舶进出港导航研究以及海上事故分析研究等任务。船舶操纵数学模型是建立船舶运动控制策略的基础,同时为检验这种控制策略的性能提供一个闭环仿真环境。

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:

(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 Carriers, 载液化天然气 20 万立方米以上)。

2000 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 3 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 7 000 TEU 和 8 000 TEU 的集装箱船就算很大了,现在马士基 14 000 TEU 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、干货船和油船。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,常运的危险品在 7 000 种左右,常运的普通货物在 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 30 kn 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 25~30 kn,比过去的普通货船快 1 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（1993）的发展历程，进入高精度卫星导航定位时代。美国开发的全球定位系统（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 GPS 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，欧盟正开发伽利略卫星导航定位系统（中国参与了合作开发）。

传统的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与下载，这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 7 000 m 载人潜器研制为重点，大力发展深海探测技术体系，该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、多数据整合技术，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。

1.1.1 船舶运动的手动控制和自动控制

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、自动离靠泊控制器等，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最有效的手段。

船舶运动自动控制可概分为 5 类情况：一是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；二是港区航行及自动离靠泊问题，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；三是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等；四是船舶减摇控制，主要包括鳍减摇控制、舵减摇控制和舵鳍联合减摇控制等；五是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[7]认为第 5 类船舶运动控制是本学科的发展新趋势。除上述 5 类典型船舶运动控制问题外，还可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。

从智能控制的角度看，船舶运动控制可认为是一个分层递阶式的人—机控制系统，其逻辑结构如图 1.1 所示，系统从上到下分为任务规划、协调调度、控制策略、控制执行 4 层结构，通过信息反馈形成多个闭环，操作者通过人机界面可监视或参与各层的行为。

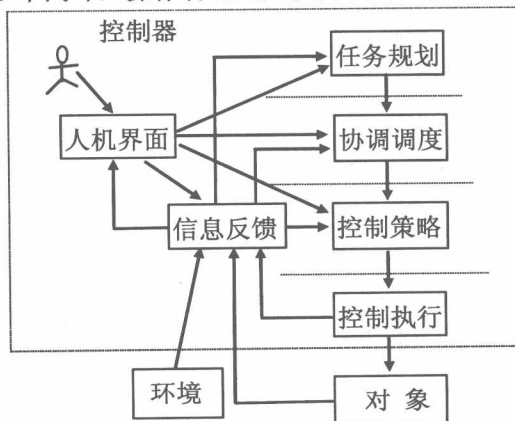


图 1.1 船舶运动控制系统

- (1) 任务规划层 实现航路规划、气象导航、航行日程安排、综合导航、各子系统目标分配等总体决策任务。
- (2) 协调调度层 接受任务规划层下达的目标，根据全船系统状态合理调度各子系统的

控制策略，使各子系统互相协调有条不紊地工作，最终高效地完成总体控制任务。

(3) 控制策略层 给出每种子系统的控制算法，用以直接操纵各种执行机构去控制各自的对象。该层与前面两层相比，任务更显艰巨，因为它要完成多个闭环控制任务，而每一个闭环系统都涉及控制质量特别是稳定性的保证问题，这对控制算法的研究、设计、选择和运用提出了挑战。可以说船舶运动控制领域的核心问题就是如何不断地改进控制策略——控制算法，以保证在具有干扰的环境下和船舶本身存在动态特性改变（因航速或装载等变化引起）的条件下仍能满足航运界不断提高的性能指标要求。

(4) 控制执行层 该层由硬件实现。各式各样的执行机构本身都是一些动态环节，它们会在相当的程度上影响到整个控制系统的性能，例如舵叶转动速率限制、最大转角限制和操舵响应时间延迟等因素都会使航向保持性能恶化。如何从控制策略的角度重视执行器动态的存在，设计出能同时照顾到被控过程和执行器的动态特性的控制算法以改进整体控制质量是一个应予强调的方面，人们总是有意或无意地忽视了执行机构对控制带来的不利影响。

(5) 信息反馈 它是系统认知的渠道，通过传感器与信号传递（通信）手段使得被控过程的状态信息得以反馈到控制策略层的各种控制器，从而具体形成控制闭环。目前常用的船用信号传感器可举出：(a) 陀螺罗经（Gyro compass）或电子式磁罗经，提供本船航向信息；(b) 计程仪（Speed log），可以分别示出本船对地或对水的航速；(c) 角速度陀螺（Rate gyro），用于测量本船回转角速率；(d) GPS（全球定位系统）接收机，给出本船经度、纬度以及国际标准时间等信息；(e) 罗兰 C（一种无线电定位系统）接收机，用于接收本船经纬度信息；(f) ARPA（Automatic Radar Plotting Aids），实质是一种数字雷达，能够提供多达 30 艘目标船的运动状态信息，包括各目标船与本船之距离、目标船对本船之方位、目标船航向、目标船航速，还包括各目标船距本船的最近会遇距离（DCPA, Distance of Closest Point of Approach）以及目标船与本船的最近会遇时间（TCPA, Time to Closest Point of Approaching）；ARPA 还可提供海岸线、防波堤外形、岛屿与轮廓线等水陆分界图形曲线的数据（Navlines）。以上各种传感器的测量信息都是按照美国电子航海仪器接口信号标准 NMEA0183 的格式设计的，它们可以很方便地经串行接口被引入控制计算机。

(6) 人机界面 人机界面是人与机器进行信息和命令交换的场所。传统的人机界面以图形学与人机工程学为基础设计信息显示画面和设置传达指令的方式如采用按键、旋钮、手柄、触摸屏等，并辅以声、光报警等功能。当前基于一人驾驶台操作体制的综合船桥系统的人机界面主要特点是以电子海图显示与信息系统（ECDIS）为核心，并且通过计算机接口接收各传感器送来的本船运动状态信息及 ARPA 雷达送来的跟踪目标船的运动状态信息，而后以适当的方式将这些信息一一显示在同一个电子海图上。当前已经成熟的多媒体技术及虚拟现实技术，将有可能在不久的将来被用来把船舶人机交互功能提高到智能化水平。

1.1.2 船舶自动操舵仪（Autopilot）

船舶自动操舵仪又称自动舵，用于航向保持/航向改变/航迹保持控制。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 系统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 (Track keeping) 而言航向保持 (Course keeping) 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 1.2 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：

$$\delta = f_1(\Delta\psi, r) \tag{1.1}$$

如果取 δ 与 $\Delta\psi$ 和 r 成线性关系，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。为提高控制性能必须引用各种先进的控制策略。

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的切线方向，如图 1.3 所示，航迹自动舵的输出舵角应该是 $\Delta\psi, r$ 及 η 的函数：

$$\delta = f_2(\Delta\psi, r, \eta) \tag{1.2}$$

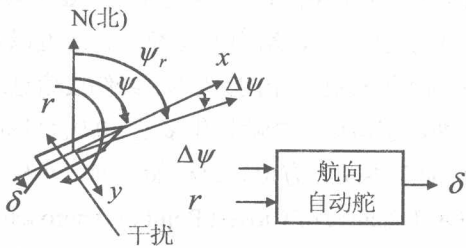


图 1.2 航向保持问题

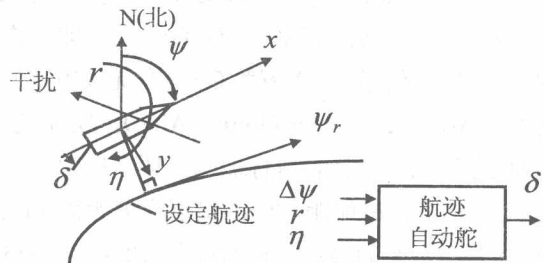


图 1.3 航迹保持问题

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, 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 (图 1.4 (a))：外环 (航迹环) 的功能为将 GPS 接收的船位数据与计划航线比较，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，使船首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 $\delta(k) \Rightarrow \Delta\psi(k) \rightarrow 0 \Rightarrow \eta(k) \rightarrow 0$ ，由舵角去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，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（图 1.4（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 SIMO（单入多出）的。其缺点是系统调试的难度增大，运行灵活性不足。

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可举出 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。

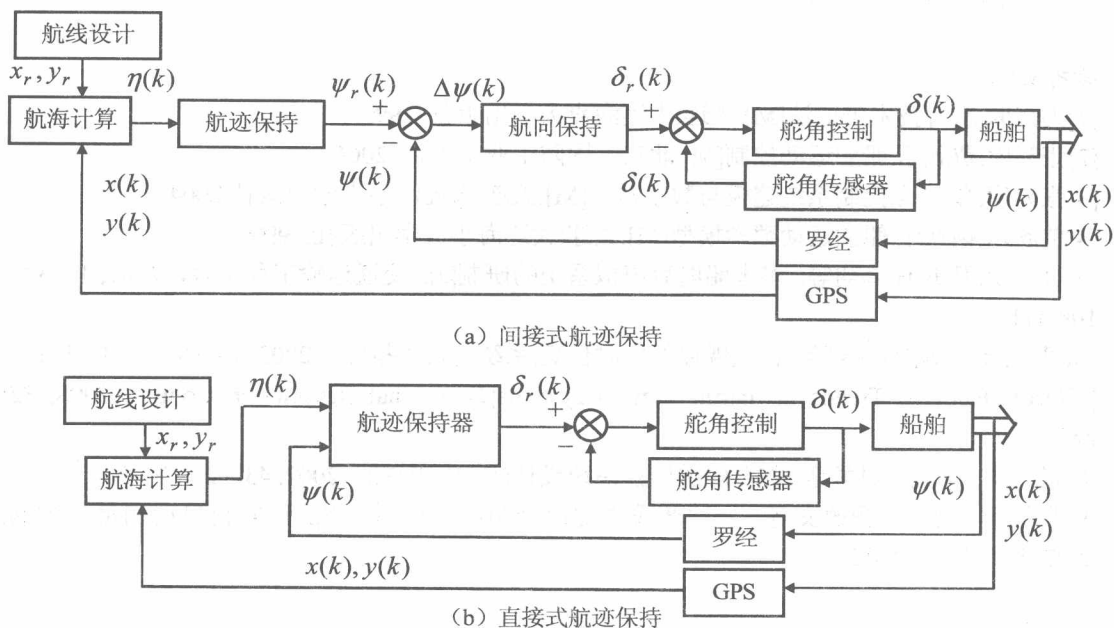


图 1.4 船舶航迹保持的两种方案

1.1.3 航行综合监视与控制

在船舶自动化领域，先进的控制手段历来是为实现节能、减少船员定员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，观念有了明显的更新和变化，航行安全突出地受到重视，原因有如下几个方面：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（Very Large Crude Carrier）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 and 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发

展,不妨将这类系统统称之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)把航海自动化子系统、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、简捷的形式(文字、曲线、图形)把那些最关键的航海、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,并把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航行管理系统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系统,称之为Sea-Net。(4)笔者曾对综合航海控制系统做过一些实验室研究,参见文献[8],[9]。

参考文献

- [1]冯兴耿.航海技术辩证法[M].大连:大连海事大学出版社,1995.
- [2]张显库,贾欣乐.船舶运动控制[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [3]张显库,金一丞.控制系统建模与数字仿真[M].大连:大连海事大学出版社,2004.
- [4]贾欣乐,杨盐生.船舶运动数学模型[M].大连:大连海事大学出版社,1999.
- [5]金一丞,尹勇,任鸿翔等.多本船航海模拟系统的研制[J].交通运输工程学报,2001,1(3):108-111
- [6]尹勇,金一丞,任鸿翔等.自然现象的实时仿真.系统仿真学报[J],2002,14(9):1217-1219
- [7]Geoff Roberts. Trends in marine control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32: 263-269.
- [8]张显库,任光,刘军等.综合船舶监控系统设计[J].中国造船,2002,43(2):71-80.
- [9]张显库,任光,颜德文等.一种低成本的综合船舶监控系统[J].计算机自动测量与控制,2002,10(2):118-120.

第 2 章 船舶运动控制的特点

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之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例如航向、船位等都有一定的误差，后者呈现为一种随机噪声，因而我们不得不面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（即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——例如 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。

一个控制器如果能够能够在被控过程存在不确定性、干扰及量测不精确性条件下使闭环控制系统稳定，称该系统具有鲁棒稳定性（Robust Stability）；若在此基础上系统同时满足规定的性能指标，则称之为具有鲁棒性能（Robust Performance）。显然，这是研究者追求的最后目标和闭环控制系统的最终境界。

综上所述，船舶运动控制的特点概括为“8个3”。

(1) 船舶具有桨、舵、锚 3 大主动操纵设备，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，理论上也可以没有锚。

(2) 船舶运动在海中受到风、浪、流 3 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 3 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 3 种转动运动，与 3 种平移运动一起构成 6 个自由度的船舶运动体系。

(5) 船舶运动涉及不同的气象、水文、航道 3 种航行环境，异常复杂。

(6) 船舶运动存在着装载、航速、量测 3 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、生态灾难和货物的损失巨大，人命损害巨大 3 个价值巨大体现。

(8) 因此, 船舶运动控制需要经验、技巧和科学, 要求控制优良。

参考文献

- [1]张显库,贾欣乐.船舶运动控制[M].北京:国防工业出版社, 2006.
- [2]张显库,金一丞.控制系统建模与数字仿真[M].大连:大连海事大学出版社,2004.
- [3]贾欣乐,杨盐生.船舶运动数学模型[M].大连:大连海事大学出版社,1999.