

船舶运动控制

张显库 贾欣乐 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

责任编辑：李宝东 bdli@ndip.cn
责任校对：钱辉玲
封面设计：王晓军 xjwang@ndip.cn

船舶运动控制

作者简介

张显库，男，辽宁辽阳人，大连海事大学教授、博士生导师、交通信息工程及控制国家重点学科学术带头人。从事船舶运动控制和鲁棒控制研究。1998年在大连海事大学获博士学位。

已编著出版《Visual Basic工程应用实例》、《船舶运动智能控制与H_∞鲁棒控制》、《Visual Basic程序设计》、《VB实用编程技术》和《控制系统建模与数字仿真》5部著作。

在国际学术期刊及国家级学术刊物上共发表学术论文60余篇，其中：国际学术期刊论文6篇，国内11种EI检索源期刊论文20余篇。论文被SCI收录3篇，被EI收录20余篇，论著被同行引用110次。

科研项目“综合船舶监控系统”获辽宁省科技进步二等奖（排名3），“一种简化的H_∞混合灵敏度算法”获辽宁省自然科学三等奖（排名1），“智能式航迹舵产品化研究”获交通部科技进步三等奖和辽宁省发明创造一等奖，“H_∞鲁棒控制自动舵研究”获大连市技术开发一等奖（排名2）。参加或主持完成了国家自然科学基金、国家博士点基金、交通部、新加坡海军、大连市、大连机车车辆厂、锦州航海仪器厂、大连远洋运输公司的20余项科研项目。

1999年获全国交通系统青年岗位能手称号，2001年被评为辽宁省优秀青年骨干教师，2004年入选辽宁省百千人才工程。2004年被选为国家自然科学基金评审专家，2005年被选为教育部博士点基金评审专家。现为《IEEE on Fuzzy System》、《控制与决策》、《系统工程与电子技术》、《黑龙江大学自然科学学报》、《测试技术学报》等8种国际或国内核心期刊的审稿专家。

— 上架建议：船舶技术 —

<http://www.ndip.cn>

ISBN 7-118-04292-7



9 787118 042924 >

ISBN 7-118-04292-7/U · 306

定价：26.00 元

船舶运动控制

张显库 贾欣乐 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

当前船舶运动控制研究面临的主要问题在于船舶动态的不确定性、随机的环境干扰以及量测信息的不精确性,传统控制策略的效果不能令人满意。神经网络控制(NNC)、模糊控制(FLC)、混合智能控制(HIC)、 H_{∞} 鲁棒控制(HIRC)及非线性控制(NC),为解决上述问题、设计高水平的船舶运动控制器提供了新的契机。

本书系统地总结了近20年来国内外学者将NNC、FLC、HIC、HIRC、NC应用于船舶运动控制所取得的主要成果,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。书中融入了笔者对船舶运动科学的一系列思考所得和研究设计范例,从而使本书有可能避免泛泛空谈的弊端,其个性化的笔触给予读者以平等交谈的亲切感。

本书共分7章:绪论,船舶运动数学模型,神经网络控制,模糊控制,混合智能控制, H_{∞} 鲁棒控制,非线性控制。

本书可供交通信息工程及控制、航海科学与技术、轮机工程、船舶自动化、船舶设计与制造、控制理论与控制工程专业的硕士生、高年级本科生作为船舶运动控制课程的教材及教学参考书,对船舶运动控制器研究和设计人员有重要参考价值。

为方便将本书作为教材使用,根据每章的重点内容在每章的后面都编写了习题,可供学生复习和强化每章的知识点,也可供教师出考试卷参考。在书的最后给出了书中重点内容的实验编排及设计,每个实验的重点内容和程序都给出了提示,方便教师和学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

船舶运动控制 / 张显库, 贾欣乐编著. —北京: 国防工业出版社, 2006. 2

ISBN 7-118-04292-7

I. 船... II. ①张... ②贾... III. 船舶运动 - 运动控制 IV. U661.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 009301 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13 1/4 字数 314 千字

2006 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

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、经济性和舒适性。

近 20 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到该领域,为船舶运动控制科学的发展注入了活力。2002 年笔者受大连市学术著作基金资助出版了专著《船舶运动控制与 H_∞ 鲁棒控制》,该书系统地总结了这一期间内智能控制和 H_∞ 鲁棒控制在船舶运动与操作中的应用成果,为发展我国新一代的船舶导航及控制系统提供了理论依据及算法和设计范例。但该书学术性太强且篇幅稍长(51 万字),不适于作为本科生同名课程的教材使用,本教程在该专著的基础上,保留了原书的精髓,精减了内容,使之更易理解,根据实际教学实践,增添了部分新内容,给出了习题和练习,并编排了实验内容。

本书可供交通信息工程及控制、航海科学与技术、轮机工程和控制理论与控制工程类专业的本科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器研究和设计人员参考。

本书获得教育部博士点专项基金项目“船舶运动混合智能控制(98015101)”的资助,在此深表谢意!

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、指正。

作 者

2005 年 12 月于大连海事大学

目 录

| | |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 船舶运动控制概述 | 1 |
| 1.2 船舶运动控制研究的基本问题 | 6 |
| 1.3 船舶运动控制策略 | 7 |
| 习题..... | 9 |
| 第 2 章 船舶运动数学模型 | 11 |
| 2.1 引言..... | 11 |
| 2.2 船舶平面运动的线性化数学模型..... | 12 |
| 2.2.1 船舶平面运动的非线性模型和线性模型..... | 13 |
| 2.2.2 状态空间型船舶平面运动数学模型..... | 15 |
| 2.2.3 传递函数型的船舶运动数学模型..... | 17 |
| 习题 | 18 |
| 第 3 章 神经网络控制 | 19 |
| 3.1 神经网络控制引论..... | 19 |
| 3.1.1 人工神经元与人工神经网络..... | 19 |
| 3.1.2 ANN 的基本结构 | 21 |
| 3.1.3 ANN 的学习方法 | 22 |
| 3.1.4 ANN 的特点和优点 | 23 |
| 3.1.5 ANN 的发展简史 | 24 |
| 3.2 MLP 的 BP 训练方法 | 25 |
| 3.2.1 MLP 的结构和前向算法 | 25 |
| 3.2.2 MLP 的误差反向回传算法(BP 算法)..... | 26 |
| 3.2.3 有关 BP 算法的一些问题 | 29 |
| 3.2.4 BP 算法的一个简例 | 31 |
| 3.3 神经网络控制方案概述..... | 32 |
| 3.3.1 监督控制..... | 32 |
| 3.3.2 直接逆控制..... | 33 |
| 3.3.3 间接控制..... | 33 |
| 3.3.4 直接控制..... | 34 |
| 3.3.5 内部模型控制..... | 35 |
| 3.4 监督控制在船舶自动舵中的应用..... | 36 |

| | | |
|--------------|-------------------------------------|-----------|
| 3.5 | 直接控制应用于船舶自动舵 | 37 |
| 3.5.1 | 用于航向保持的 SISO 神经网络自动舵结构 | 37 |
| 3.5.2 | 直接控制式航向保持器 NNC 的训练方案 | 38 |
| 3.5.3 | 直接控制式航向保持器 NNC 的训练方法 | 40 |
| 3.5.4 | 直接控制 NNC 自动舵的仿真研究结果 | 42 |
| 3.6 | 内部模型控制应用于船舶自动舵 | 42 |
| 3.6.1 | 航向保持环 | 42 |
| 3.6.2 | 转向控制器 | 46 |
| | 习题 | 47 |
| 第 4 章 | 模糊控制 | 49 |
| 4.1 | FLS 概论 | 49 |
| 4.1.1 | 人类思维的两种模式 | 49 |
| 4.1.2 | 模糊逻辑系统与模糊逻辑控制 | 49 |
| 4.1.3 | FLS 的发展简史 | 51 |
| 4.2 | FLC 基本原理 | 52 |
| 4.3 | 模糊规则的提取方法 | 62 |
| 4.3.1 | 基于直接匹配的模糊规则抽取方法 | 62 |
| 4.3.2 | 基于乘积空间聚类的模糊规则提取方法 | 65 |
| 4.4 | FLC 在船舶运动控制中的应用 | 67 |
| | 习题 | 69 |
| 第 5 章 | 混合智能控制 | 71 |
| 5.1 | 混合智能控制系统引论 | 71 |
| 5.2 | 适应式混合智能系统 ANFIS 及其在船舶控制领域的应用 | 75 |
| 5.2.1 | ANFIS 的神经网络结构 | 75 |
| 5.2.2 | ANFIS 的训练 | 79 |
| 5.2.3 | ANFIS 用于自动舵控制算法设计 | 84 |
| 5.2.4 | ANFIS 系统小结 | 89 |
| 5.3 | 模糊自适应学习控制网络 FALCON 及其在船舶运动控制领域的应用 | 90 |
| 5.3.1 | FALCON 的结构 | 90 |
| 5.3.2 | FALCON 的学习策略 | 94 |
| 5.3.3 | FALCON 的应用——船舶航向保持和航向改变的模糊自适应学习控制策略 | 99 |
| 5.4 | 遗传算法(GA)及其在船舶运动控制器优化中的应用 | 105 |
| 5.4.1 | GA 算法概述 | 105 |
| 5.4.2 | 遗传算法的进一步讨论 | 108 |
| 5.4.3 | GA 用于优化 Fuzzy Autopilot 参数之例 | 112 |
| 5.4.4 | GA 应用于神经网络训练 | 114 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 5.5 | 模拟退火算法及其在船舶运动控制器优化中的应用 | 117 |
| 5.5.1 | SA 算法的物理基础 | 117 |
| 5.5.2 | SA 算法 | 119 |
| 5.5.3 | SA 算法在船舶运动控制器优化中的应用 | 121 |
| | 习题 | 123 |
| 第 6 章 | H_{∞} 鲁棒控制 | 126 |
| 6.1 | 准备知识 | 126 |
| 6.2 | H_{∞} 鲁棒控制理论概述 | 131 |
| 6.3 | 混合灵敏度算法 | 133 |
| 6.3.1 | 小增益理论 | 133 |
| 6.3.2 | 模型不确定性 | 135 |
| 6.3.3 | H_{∞} 控制的混合灵敏度问题 | 137 |
| 6.3.4 | H_{∞} 标准问题 | 139 |
| 6.4 | 回路成形算法 | 141 |
| 6.4.1 | 回路成形概念及其控制器的直接解法 | 141 |
| 6.4.2 | 回路成形 H_{∞} 控制算法 | 142 |
| 6.5 | 闭环增益成形控制算法 | 147 |
| 6.5.1 | SISO 系统闭环增益成形控制算法 | 147 |
| 6.5.2 | MIMO 系统的闭环增益成形控制算法 | 150 |
| 6.5.3 | PID 控制器参数整定新方法 | 153 |
| 6.5.4 | 用镜像映射方法求非稳定过程的鲁棒控制器 | 157 |
| 6.5.5 | 非方阵被控对象闭环增益成形算法及其应用 | 158 |
| 6.6 | μ 分析 | 160 |
| 6.7 | H_{∞} 鲁棒控制在船舶运动控制中的应用 | 165 |
| 6.7.1 | 混合灵敏度算法应用 | 165 |
| 6.7.2 | 一种变形的回路成形控制器及应用 | 167 |
| 6.7.3 | 闭环增益成形算法应用 | 169 |
| 6.7.4 | μ 分析应用 | 170 |
| | 习题 | 171 |
| 第 7 章 | 非线性控制 | 173 |
| 7.1 | 非线性控制理论发展概述 | 173 |
| 7.2 | 基于精确反馈线性化的非线性控制 | 174 |
| 7.2.1 | 非线性系统的基本概念 | 175 |
| 7.2.2 | 基于精确反馈线性化方法的船舶运动航向保持控制 | 177 |
| 7.3 | 基于 Backstepping 的非线性控制 | 182 |
| 7.3.1 | Lyapunov 理论 | 182 |
| 7.3.2 | 基于 Backstepping 方法的船舶运动航向保持控制 | 183 |

| | |
|---|-----|
| 7.4 两种非线性 PID 控制器 | 188 |
| 7.4.1 基于精确反馈线性化和闭环增益成形算法的船舶航向 PID 控制器 ... | 188 |
| 7.4.2 由闭环增益成形算法构成的非线性鲁棒 PID 控制器 | 189 |
| 7.5 不对称信息理论 | 190 |
| 7.5.1 不对称信息理论 | 190 |
| 7.5.2 简化鲁棒控制算法增加信息传递量 | 191 |
| 7.5.3 改进舵机执行机构增加信息传递量 | 192 |
| 习题 | 194 |
| 参考文献 | 196 |
| 附录 | 201 |
| 实验 1 计算船舶运动 Nomoto 数学模型 | 201 |
| 实验 2 ANFIS 用于自动舵控制算法设计 | 201 |
| 实验 3 用 GA 优化模糊控制器及其应用 | 203 |
| 实验 4 基于闭环增益成形的鲁棒 PID 算法及在液位控制中的应用 | 211 |

第 1 章 绪 论

1.1 船舶运动控制概述

人类文明的进步与海洋运输密切相关。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的危险,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。

1. 历史的回顾

18 世纪产业革命带来了今天意义上的轮船:钢质船壳可承载成千上万吨货物;螺旋推进器约于 140 年前投入使用,由发动机以几千马力^①甚至上万马力使之转动,产生数十吨推力使船以十几节到二十几节的速度行驶;由动力驱动的操舵装置约于 120 年前建成,能以数十吨米的转船力矩,使船头以 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 每秒的角速率回旋,从而达到转向或航向保持的目的。110 年前发明的柴油机,以更大的功率、更高的热效率和更小的单机重量取代了蒸汽机,至今仍然占船舶推进主机的大多数。1920 年陀螺罗经被用于船舶导航,使航向测量精度达到 1° 的量级,为自动操舵仪的诞生准备了条件;1940 年流体力学的发展,统一解释了船体、桨、舵产生流体动力的机理,为建立船舶运动数学模型奠定了理论基础。

2. 船舶运动的复杂性

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 种平移及转首、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锚力。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,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数学模型方程中诸多参数的量值,这主要靠船模

^① 1 马力 = 735.499W

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;我国大连海事大学最近在“211 工程”推动下制成了具有三维动态图像的船舶操纵模拟器,并已实现产品化。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。

3. 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,船舶运营中一些最困难、最复杂的控制任务如避碰、离靠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、航迹保持系统和航速控制系统,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 3 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幅度等。本书将主要面向第一类问题。除上述 3 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、水下机器人自主运动控制、防摇鳍阻摇及舵阻摇控制等。

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 1.1.1 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。

(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到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

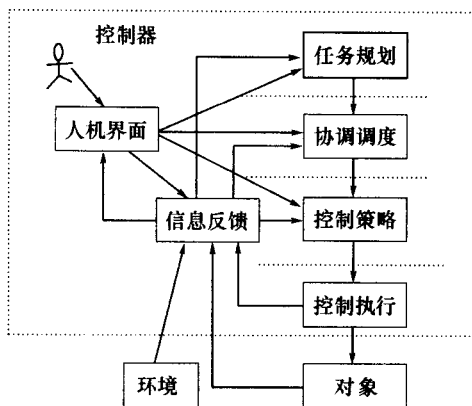


图 1.1.1 船舶运动控制系统

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。对各种控制算法的深入讨论是本书的宗旨。

(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:①陀螺罗经(Gyro Compass)或电子式磁罗经,提供本船航向信息;②计程仪(Speed Log),可以分别示出本船对地或对水的航速;③角速度陀螺(Rate Gyro),用于测量本船回转角速率;④GPS(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;⑤LORAN-C(一种无线电定位系统)接收机,用于接收本船经纬度信息;⑥ARPA(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的距离、目标船对本船的方位、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(Distance of Closest Point of Approach, DCPA)以及目标船与本船的最短会遇时间(Time to Closest Point of Approach, TCPA);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)。以上各种传感器的量测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的主要特点是以电子海图显示信息系统(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。

4. 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。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、微型计算机化的产品相继问世。20 世纪 80 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 1.1.2 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 $\Delta\psi = \psi_r - \psi$ 和转首角速度 r 的函数:

$$\delta = f_1(\Delta\psi, r) \quad (1.1.1)$$

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点的切线方位,如图 1.1.3 所示,航迹自动舵的输出舵角应该是 $\Delta\psi$ 、 r 及 η 的函数:

$$\delta = f_2(\Delta\psi, r, \eta) \quad (1.1.2)$$

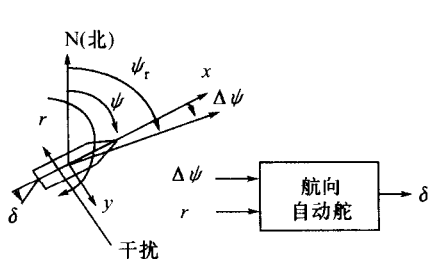


图 1.1.2 航向保持问题

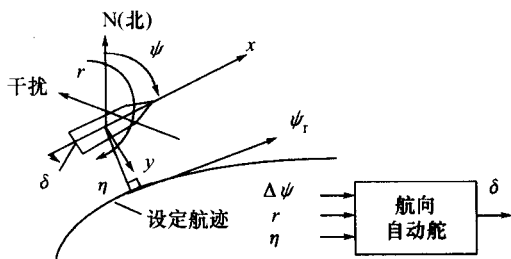


图 1.1.3 航迹保持问题

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,如图 1.1.4(a)所示。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,如海底电缆敷设、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,如图 1.1.4(b)所示,它同时接收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。

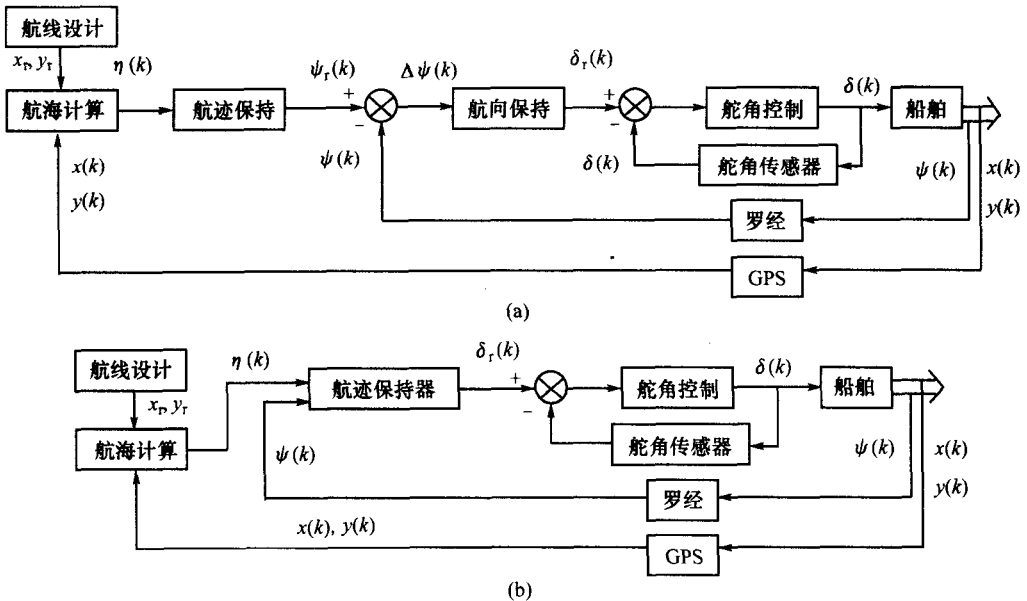


图 1.1.4 船舶航迹保持的两种方案
(a) 间接式航迹保持; (b) 直接式航迹保持。

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。

5. 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。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轮触礁和一艘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)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络系统,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,如综合船舶监控系统设计、一种低成本的综合船舶监控系统等。

1.2 船舶运动控制研究的基本问题

船舶动态具有大惯性特点,万吨级油轮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。

一个控制器如果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系统的最终境界。

1.3 船舶运动控制策略

控制策略是船舶运动控制科学的主要研究对象。从 20 世纪 20 年代到 70 年代,自动舵的 PID 算法延续了 50 年;70 年代~80 年代出现自适应控制并在自动舵商品化方面获得了成功,产生了明显的经济效益;90 年代始,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新控制算法,如神经网络控制、模糊控制、多模态仿人智能控制、混合智能控制、 H_∞ 鲁棒控制等都被不同程度地引入到自动舵研制之中,为船舶运动科学的进一步发展注入了活力。本书作者及其同事们在过去十余年中曾尝试将多种现代控制策略应用于船舶自动操舵仪,包括最小方差控制、LQG 控制等自适应控制策略、广义预测控制、 H_∞ 鲁棒控制、不确定系统的鲁棒控制——变结构鲁棒控制、自适应变结构鲁棒控制、多模态仿人智能控制、神经网络控制以及模糊控制等。

尽管这些成果和经验表面上相当丰富,但是市场上出售的自动舵却只限于 PID 自动舵及少量的自适应自动舵。这种反差一方面源于从理论发现到工程实用不可避免地存在着一段滞后;另一方面也是因为海上环境的严酷促使人们优先采用成熟可靠的技术和产品。新的东西包括自动舵的新结果除了理论优秀之外,必须能经受住实践的检验,而这正是到目前为止大部分的“新成果”所欠缺的。它们一般只做到仿真阶段,而再好的仿真环境也难于完全真实地描述被控过程和海上环境的动态特性,所以从仿真结果令人满意到海试结果令人满意尚有相当的距离,而要实现满足海上实航性能指标要求的产品化,所需的工作恐怕比初期的理论研究还要大数倍,这里面包括关于算法鲁棒稳定性和鲁棒性能的深入探讨、系统软件和硬件的安全监督、系统实现中的工艺可靠性保证等方面的问题。

1. PID 控制

PID 控制简单、可靠,物理意义明显,目前仍被广泛地应用在实际工程控制中。经典的 PID 控制逐渐发展成自整定 PID 控制、自适应 PID 控制、鲁棒 PID 控制等改进型算法,克服了经典 PID 控制参数整定困难、适应性差、鲁棒性差和控制精度较低等不足。

目前 PID 控制器设计方法大致可分为 4 类,第 1 类是 PID 参数根据经验整定或试凑获得,有些方法根据自学习原理或大量的实践经验发展成为 PID 自整定算法或专家系统整定方法;第 2 类是依据某种与误差有关的最优性能指标,通过优化指标值来完成设计,常见的指标有 ISE、ITAE 等;第 3 类是依据闭环系统极点位置来调节 PID 控制器的参数;第 4 类是基于特定的理论进行 PID 控制器优化设计,如基于 H_∞ 控制算法的 PID 控制器

设计和基于 μ 分析的鲁棒 PID 控制器设计。一般来说,第 1 类方法注意经验的学习,理论指导差一些;第 2 类方法注重系统的响应品质;第 3 类方法更多地考虑了闭环系统的内部特性;第 4 类方法强调了设计的 PID 控制器具有鲁棒性,但该类方法的特点是算法复杂,需要艰深的数学基础。

实际航向保持的控制性能目标可大略描述如下。

(1) 静态性能:一般海况下航向保持精度在 $0.5^\circ \sim 1.0^\circ$ 范围内,恶劣海况下在 $1.0^\circ \sim 3.0^\circ$ 范围内;具备消除恒值干扰的能力。

(2) 对装载、航速变化有鲁棒性,对天气变化有适应能力。

(3) 能抑制海浪的高频干扰 ($0.3 \text{ rad/s} \sim 1.25 \text{ rad/s}$),并保证在八级风以内工作稳定。

(4) 在转向时,一般海况下航向基本无超调(小于 5%),调节时间小于航迹引导的周期 ($30 \text{ s} \sim 60 \text{ s}$)。

(5) 动舵次数少,幅度尽量小,以节约能耗,并减少舵机系统的磨损。

经典的 PID 控制器 $K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$ 利用比例系数 (K_P)、积分时间 (T_I)、微分时间 (T_D) 3 个参数进行控制器整定。但是,这 3 个参数和过程的运行状态及环境变化之间的依存关系是不明朗的,操作人员需进行过程的某种动态试验(例如飞升特性试验)方能在所获数据(例如对象增益、时间常数、纯迟延)基础上进行参数整定,而对于像船舶这样的被控过程实时进行所述的试验是不现实的,因而驾驶员通常是按经验确定这些参数,很难达到满意程度,并且运行条件变动之后还须重新整定才能达到最优(较好)效果,故大多数情况下是根本不进行参数整定的。一般情况下,改进的 PID 控制是用与船舶航行状况及气候条件直接相关的“装载”、“天气”、“航速”3 个参数取代经典的 K_P 、 T_I 、 T_D 参数,而把一系列计算过程让系统自行完成;当航速由 GPS 自动计算时,实际上只需调整装载与天气两个参数,一方面整定参数减少,另一方面更主要是参数的含义清楚,这就大大简化了驾驶人员的操作,并可使航向保持效果达到最优,从实践上说,这无疑是在前进一步。

2. 自适应控制

自适应控制主要可分为自校正调节器(STR)和模型参考自适应控制器两个分枝。瑞典 Lund 控制学派带头人 Astrom 在创立 STR 理论的同时于 20 世纪 70 年代~80 年代就深入研究过船舶模型辨识和船舶运动自适应控制,并提出一种基于谱分解的 LQG 航向保持算法。Astrom 当时的博士研究生 Kallstrom 所设计的油轮航向保持 STR 结合了最小方差控制器和最小二乘辨识器,并用 Kalman 滤波器提供状态估计,而在转向控制器中则应用多模态控制算法,这一工作在船舶自动舵领域中具有典型意义,并为后来众多的研究者引用。

在自适应自动舵研究领域 Holzhueter 的工作占有重要地位。由于曾长时间在航海仪器制造厂家(Anschutz & Co.)做自动舵设计和算法研究工作,因而他较成功地解决了书本理论和实际产品之间的结合问题;他所应用的算法仍不外乎 3 个主要方面:基于状态反馈的 LQG 控制、基于速度增益的 Nomoto 低频船舶模型参数 K 、 T 的估计、应用递推 LS 的高频模型参数辨识和提供状态估计的 Kalman 滤波器。他的高精度航迹保持器海上试验结果的良好性能给人以深刻印象,该结果最终转化为定型产品 NDA-W1 也在情理