

张显库 著

载运工具的控制

ZAIYUN GONGJU DE KONGZHI



大连海事大学出版社

载运工具的控制

张显库 著

大连海事大学出版社

© 张显库 2009

图书在版编目 (CIP) 数据

载运工具的控制 / 张显库著. —大连: 大连海事大学出版社, 2009. 5
ISBN 978-7-5632-2297-1

I. 载… II. 张… III. 交通运输工具—控制—高等学校—教材 IV. U

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 069216 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

大连华伟印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm×260 mm 印数: 1~500 册

字数: 324 千 印张: 13.25

责任编辑: 史洪源 版式设计: 海 韵

封面设计: 王 艳 责任校对: 高 炯

ISBN 978-7-5632-2297-1 定价: 27.00 元

本书由

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 Academic Works Publishing Foundation of

Dalian Maritime University

内容提要

载运工具的控制包括：飞机、汽车、火车、磁悬浮列车、船舶、水下潜器等各种载运工具的控制。其研究面临的主要困难在于载运工具的不确定性、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)为克服上述障碍、设计高水平的载运工具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应用于载运工具的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；书中融入了笔者对载运工具控制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，其个性化的笔触献予读者以平等交谈的亲切感。

本书共分六章：船舶运动控制；水下潜器的控制；汽车防抱死制动系统的控制；机车电传动系统的控制；磁浮列车的控制；直升机的控制。

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

前 言

载运工具的控制包括：飞机、汽车、火车、磁悬浮列车、船舶、水下潜器等各种载运工具的控制。载运工具的控制是一个重要的研究领域，其最终目的是提高载运工具的自动化、智能化水平，保证其安全性、经济性、准确性。

近 20 年来控制论的全面繁荣为载运工具的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，为载运工具的控制科学的发展注入了活力。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，保留了原书船舶运动控制部分的精髓，进行了重新改写变成本书的一章，增加了其他如直升机、汽车、火车、磁悬浮列车等载运工具的控制，涉及笔者最近十余篇学术论文，形成了一部新的著作。

载运工具的控制因其包含船舶、飞机、火车等不同交通载运工具的控制，而大部分学者都只擅长其中的一个方面的研究，故目前有关载运工具控制方面的著作还未出现。笔者从事船舶运动控制十多年，也只是擅长这一个方面的研究。最近因要完成交通运输部的海上搜救模拟器项目的研究，其中涉及直升机的控制，要加以专门研究，加上以前为大连机车厂完成的机车电传动系统的仿真项目、指导学生研究过汽车防抱死系统的控制等，将众多的被控对象加以汇总和分析，发现它们都属于载运工具。笔者为学校的交通信息工程及控制学科的学科负责人，既然叫做交通信息工程及控制学科，总不能仅研究船舶运动控制吧，也应该研究一下其他交通工具的控制，故将现有的研究和以往的研究重新加以总结，从更高的层面分析和系统化，形成了此书。

本书的结构为手形结构，是一种稳定、灵活的结构。船舶运动控制为手掌，水下潜器、汽车、飞机、火车、磁悬浮列车的控制为 5 个手指，手指围绕着手掌，构成了载运工具控制的研究。本书的特色是以船舶运动控制为核心，结合汽车、飞机、火车等载运工具的控制，涵盖了交通信息工程及控制学科的各主要控制问题的研究。因本书 6 个部分的研究有一定的差异性，故参考文献以分章的形式给出，便于读者按研究内容索引。

贾欣乐教授参加了本书部分内容的撰写工作。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，并提出了宝贵的修改意见。本书获得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类专业的本科生及研究生作为载运工具的控制课程的教材和参考书，还可供载运工具的控制器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

2009 年 5 月于大连海事大学

目 录

第 1 章 船舶运动控制	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	4
1.3 船舶运动控制策略	5
1.4 船舶运动数学模型	7
1.5 船舶运动神经网络控制	14
1.6 船舶运动模糊控制	30
1.7 船舶运动混合智能控制	40
1.8 船舶运动鲁棒控制	86
1.9 船舶运动非线性控制	129
第 2 章 水下潜器的控制	149
2.1 自动生成的神经网络控制器及其在水下潜器中的应用	149
2.2 闭环增益成形算法应用于水下潜器研究	164
第 3 章 汽车防抱死制动系统的控制	168
3.1 引言	168
3.2 汽车防抱死制动系统的发展历史	168
3.3 ABS 的发展前景	169
3.4 车辆动力学模型	170
3.5 汽车防抱死制动系统的工作原理	170
3.6 汽车防抱死制动系统的数学模型	172
3.7 汽车防抱死制动系统的控制及仿真	173
第 4 章 机车电传动系统的控制	177
4.1 机车电传动系统结构	177
4.2 电机基本数学方程	178
4.3 机车电传动系统数学模型	180
4.4 柴油机数学模型及转速控制系统	181
4.5 机车微机系统仿真试验台	181
4.6 机车发电机鲁棒控制	183
第 5 章 磁浮列车的控制	186
5.1 悬浮系统的数学模型	186
5.2 精确反馈线性化	188
5.3 基于闭环增益成形算法的磁浮列车鲁棒控制	188

第 6 章 直升飞机的控制	194
6.1 引言	194
6.2 直升机的鲁棒控制器设计	194
6.3 直升机悬停的鲁棒控制器设计	197
6.4 小型无人直升机的鲁棒控制器设计	199

第1章 船舶运动控制

1.1 船舶运动控制概述

船舶运动控制是航海科学与技术学科的一个重要研究领域,也是载运工具控制的一个重要组成部分。航海就是驾驶船舶或其他海洋运载工具,从海洋或与海洋相通水域的一地到另一地的航行^[1]。国际海事组织(IMO)《1972年国际海上避碰规则》第一章第三条第1款:“*The word ‘vessel’ includes every description of water craft, including nondisplacement craft and seaplanes, used or capable of being used as a means of transportation on water.*”中华人民共和国海事局对该款的中译文是:“‘船舶’一词,指用作或者能够用作水上运输工具的各类水上船筏,包括非排水船舶和水上飞机。”航海概念的外延为:航海是以渔业航海、运输航海、军事航海和海洋科学考察航海为主,同时包括冒险航海、探险航海和旅游航海等。一种观点认为航海就是船筏和其他海洋运载工具的驾驶;另一种观点则认为,航海不仅包括船舶驾驶,而且也应包括轮机管理、船舶电气设备管理以及船舶通信等一切与驾驶船舶有关的内容。“大航海”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,而且还应包括一切为保证和支援船舶顺利实现其航行目的的有关技术、设施、法律、法规、管理制度和方法、人员培训等硬件和软件系统。其主要分为船舶和港口建造系统、船舶驾驶系统和航海保证和支援系统三大系统。大航海观提出的背景是系统科学发展的必然,系统科学由系统论、信息论和控制论3个部分组成。系统科学特别强调整体性原则、综合性原则、动态性原则和最优化原则。系统科学的发展、计算机及网络技术的成熟为大航海观的建立提供了理论和技术基础。船舶运动控制的研究为安全、准确、快速、经济地航海提供了理论支撑。

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^[2,3]。

1.1.1 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、起伏三种平移及转艏、横摇、纵摇三种转动。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三大主动操纵设备,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。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。

1.1.2 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、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三类情况: 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。本章将主要面向第一类问题。除上述三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: 船舶动力定位、快速船等特殊船控制、防摇鳍阻摇及舵阻摇控制等。

1.1.3 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、工艺的进步, 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 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 克服环境的干扰将船首向 ψ 维持在设定航向 ψ_r 上。航向保持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 $\Delta\psi = \psi_r - \psi$ 和转艏角速度 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,航迹保持自动舵的输出舵角应该是 $\Delta\psi, r$ 及 η 的函数

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

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1.1.1(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)将罗经采集的实际船首向 $\psi(k)$ 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1.1.1(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,故被控过程是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。

1.1.4 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VLCC(Very Large Crude Carrier)触

礁和另一艘 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^[4];其二,一人驾驶台体制已成为现实,船员编制已可减到六人,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为综合驾驶台控制系统。

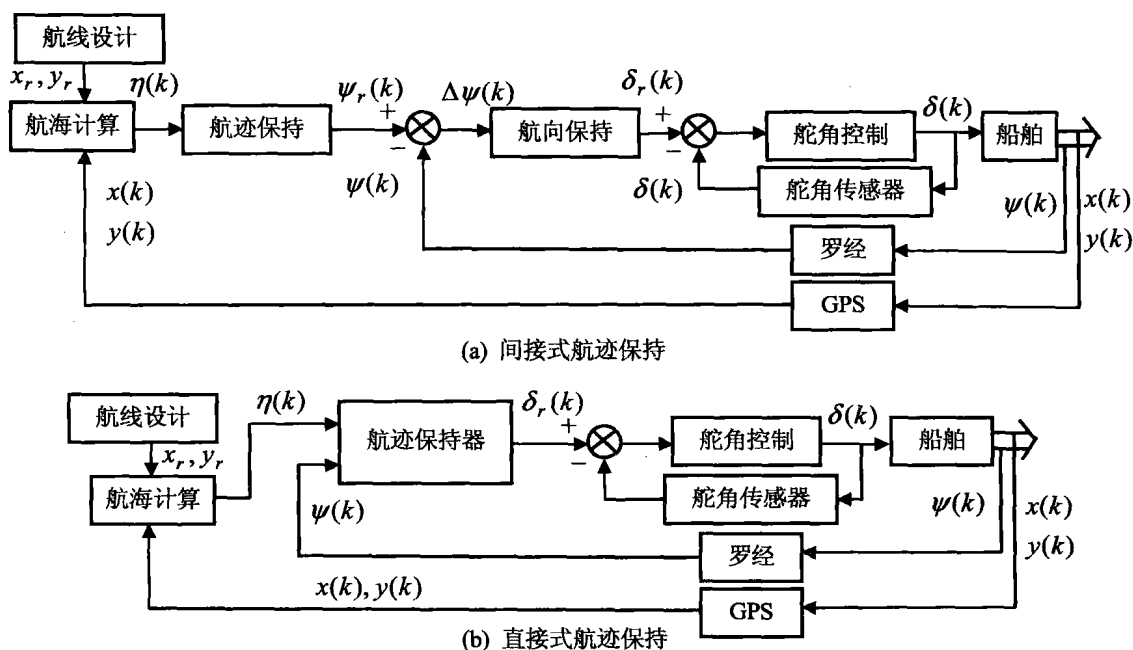


图 1.1.1 船舶航迹保持的两种方案

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^[2,3]。

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 100 s 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(在一定舵角界限内操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,引起各种流体动力系数相应改变,最终导致船舶运动数学模型的参数甚至结构产生摄动,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船首向、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(例如满足关于静态误差、最大超调量、上升时间和调节时间的要求),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;若在此基础上系统同时满足规定的性能指标,则称为具有鲁棒性能。显然,这是研究者追求的最后目标。

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至70年代,自动舵的PID算法延续了50年;70~80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、模糊控制、闭环增益成形控制以及非线性控制等^[2]。

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,新的产品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以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。

1.3.1 PID 控制

PID控制简单、可靠,物理意义明显(充分利用现在的信息(P)、过去的信息(I)和将来的信

息(D)进行控制), 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四类, 第一类是 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; 第二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; 第三类是依据闭环系统极点位置来调节 PID 控制器的参数; 第四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, 第一类方法注意经验的学习, 理论指导差一些; 第二类方法注重系统的响应品质; 第三类方法更多地考虑了闭环系统的内部特性; 第四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为:

- (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($0.3 \sim 1.25 \text{ rad/s}$), 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($30 \sim 60 \text{ s}$)。
- (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 $K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$ 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。

1.3.2 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 70~80 年代就深入研究过船舶模型辨识和船舶运动自适应控制^[5], 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^[6]。

在自适应自动舵研究领域 Holzhueter 的工作占有重要地位^[7]。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。

将模型参考自适应控制 MRAC 理论应用于船舶自动舵设计工作, 主要是 Van Amerongen 做的^[8], 该算法的系统辨识是基于 Lyapunov 稳定性理论给出 PD 航向保持器参数更新的 MIT 适应准则。本算法在船舶机动操纵(例如转向控制)中具有良好的性能, 但一般认为在航向保持状态中节能效果要逊色一些。

1.3.3 变结构控制(VSC)

VSC 是 20 世纪 50 年代在苏联发展起来的一种基于 Lyapunov 稳定性理论的控制策略, 又称滑动模态(Sliding mode)控制, 它对系统的参数不确定性和外界干扰具有较强的鲁棒性。变结构控制器的设计一般分为两个步骤: (1)选择理想的滑动模态超平面; (2)设计某种 VSC 控制律将系统的状态驱动到该超平面, 使之始终保持在该滑动模态上, 并最终渐近地趋向系统的平衡点^[9]。

1.3.4 当前流行的船舶运动控制算法

当前船舶运动控制的热门控制策略可以概分为两类: 第一类是具有自适应、自学习、自优化、自整定能力的智能式控制, 又可分成神经网络控制、模糊逻辑控制、混合智能控制等, 这些控制具有仿人脑低层物理结构和信息处理方法、仿人脑高层思维模式和学习方法等功能, 以达到在环境和控制对象特性变化时能以变应变, 审时度势, 游刃有余。它们对于过程模型存在的不确定性、干扰和量测噪声都具有良好的鲁棒性。另一类是鲁棒控制, 其实质是人为规定模型摄动传递矩阵 Δ 的上界 $\Delta_{\max}$, 在此前提下优化某一指标, 设计出保证 $\Delta \leq \Delta_{\max}$ 时系统具有鲁棒性能的控制器。H_∞鲁棒控制器是这类控制器中最典型的例子, 其工作模式是以不变应万变, 处变不惊, 以逸待劳。

1.4 船舶运动数学模型

在船舶运动控制领域, 建立船舶运动数学模型大体上有两个目的: 一个目的是建立船舶操纵模拟器为研究闭环系统性能提供基本的仿真平台; 另一个目的是为设计船舶运动控制器服务。船舶运动数学模型主要可分为非线性数学模型和线性数学模型, 前者用于船舶操纵模拟器设计和神经网络控制器、模糊控制器等非线性控制器的训练和优化; 后者则用于简化的闭环性能仿真研究和线性控制器(LQG, H_∞鲁棒控制器)的设计。

船舶的实际运动异常复杂, 在一般情况下具有 6 个自由度。在附体坐标系内考察, 这种运动包括跟随 3 个附体坐标轴的移动及围绕 3 个附体坐标轴的转动, 前者以前进速度 u 、横漂速度 v 、起伏速度 w 表述, 后者以艏摇角速度 r 、横摇角速度 p 及纵摇角速度 q 表述; 在惯性坐标系内考察, 船舶运动可以用它的 3 个空间位置 x_0, y_0, z_0 (或 3 个空间运动速度 $\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$) 和 3 个姿态角即方位角 ψ 、横倾角 ϕ 、纵倾角 θ (或 3 个角速度 $\dot{\psi}, \dot{\phi}, \dot{\theta}$) 来描述(图 1.4.1)。但这并不等于说要把这 6 个自由度上的运动全部加以考虑。数学模型是实际系统的简化, 如何简化就有很大学问。太复杂和精细的模型可能包含难于估计的参数, 也不便于分析。过于简单的模型不能描述系统的重要性能。这就需要建模时在复杂和简单之间做合理的折中。对于船舶运动控制来说, 建立一个复杂度适宜、精度满足研究要求的数学模型是至关重要的。

图 1.4.1 的坐标定义如下: $O-X_0Y_0Z_0$ 是惯性坐标系(大地参考坐标系), O 为起始位置, OX_0 指向正北, OY_0 指向正东, OZ_0 指向地心; $o-xyz$ 是附体坐标系, o 为船首尾之间连线中点, ox 沿船中线指向船首, oy 指向右舷, oz 指向地心; 方位角 ψ 以正北为零度, 沿

顺时针方向取 $0^\circ \sim 360^\circ$ ；舵角 δ 以右舵为正， r 取顺时针方向为正。对于大多数船舶运动及其控制问题而言，可以忽略起伏运动、纵摇运动及横摇运动，而只需讨论前进运动、横漂运动和艏摇运动，这样就简化成一种只有 3 个自由度的平面运动问题。图 1.4.2 给出图 1.4.1 经简化后的船舶平面运动变量描述图。

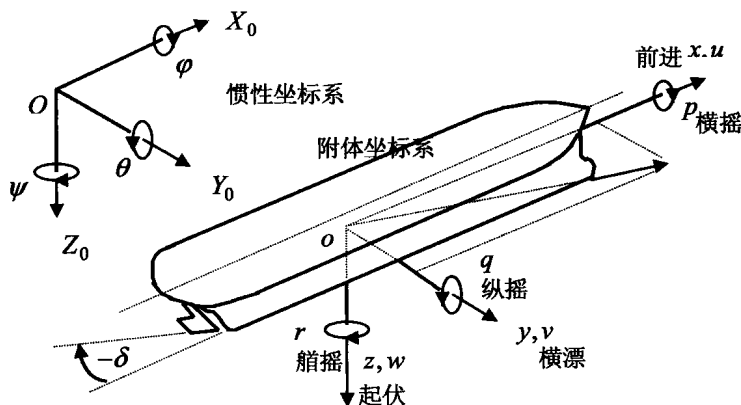


图 1.4.1 在惯性坐标系和附体坐标系中描述船舶的运动

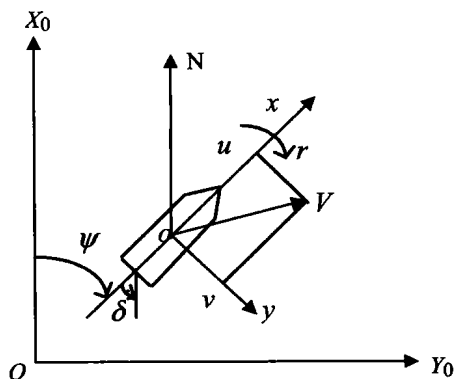


图 1.4.2 船舶平面运动变量描述

船舶平面运动模型对于像航向保持、航迹跟踪、动力定位、自动避碰等问题，具有足够的精度；但在研究像舵阻摇、大舵角操纵等问题时，则必须考虑横摇运动。本节根据刚体动力学基本理论建立船舶平面运动基本方程，据此进一步导出状态空间型(线性和非线性)及传递函数型船舶运动数学模型。这些结果将作为设计各种船舶运动控制器的基础。

在推导船舶运动方程时，做下列假设：(1)船舶是一个刚体；(2)大地参照系是惯性参照系；(3)水动力与频率无关，水的自由表面做刚性壁处理。有了第一个假设就不用考虑每个质量元素之间的相互作用力的影响；而第二假设则可以消除由于地球相对于恒星参照系的运动所产生的力。

式(1.4.1)给出船舶平面运动基本方程

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr - x_C r^2) &= X \\ m(\dot{v} + ur + x_C \dot{r}) &= Y \\ I_{zz} \dot{r} + mx_C(\dot{v} + ur) &= N \end{aligned} \right\} \quad (1.4.1)$$

式中： m 为船舶质量， x_C 为船舶重心到中心的几何距离， X, Y, N 分别为船舶在 x, y 轴上受的力及绕 z 轴的转矩。 I_{zz} 为船舶对过 o 点的垂直轴的惯性矩。

注意其形状与熟知的牛顿方程有所差异，这是由于建立船舶运动数学模型应用的 oxy 是非惯性坐标系(附体坐标是运动和旋转的)所致。式(1.4.1)左端附加项 $-mvr$ 及 mur 是船舶宏观旋转中向心惯性力和离心惯性力分量；附加项 $-mx_C r^2$ 及 $mx_C \dot{r}$ 分别是由于质心 C 对原点 o 做旋转运动产生的向心惯性力及离心惯性力，左端的附加项 $mx_C \dot{v}$ 及 $mx_C ur$ 分别代表由于质心 C 对原点 o 做旋转运动所产生的离心惯性力矩和向心惯性力矩。当附体坐标系原点取在质心 C 时， $x_C = 0$ ，可得最简形式的船舶平面运动基本方程

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X \\ m(\dot{v} + ur) &= Y \\ I_{zz} \dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \quad (1.4.2)$$

式(1.4.1)代表着三种力的平衡关系：左端是船体本身的惯性力和力矩，右端是流体对船体运动的反作用力，实际上包含了流体惯性力和力矩及黏性力和力矩。式(1.4.1)本质是非线性的，其左端显式地出现 ur, vr 等非线性项，尤其右端的 X, Y, N 将是运动变量和控制变量的多元非线性函数，结构异常复杂。

1.4.1 船舶平面运动的非线性模型和线性模型

(1) 船舶平面运动非线性数学模型

为应用式(1.4.1)求解船舶平面运动的基本变量 u, v, r ，必须具体讨论流体动力 X, Y 和力矩 N 的结构形式。研究中把船体、螺旋桨和舵视为一个整体，此时 X, Y, N 将是移动速度 (u, v) ，转角速度 (r) ，它们的时间导数 $(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r})$ ，舵角 (δ) 以及螺旋桨转速 (n) 的非线性函数

$$\left. \begin{aligned} X &= X(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta, n) \\ Y &= Y(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta, n) \\ N &= N(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta, n) \end{aligned} \right\} \quad (1.4.3)$$

完全从理论上确定式(1.4.3)的函数关系极为困难，迫使研究者不得不转向半理论半经验的方法或多元数据回归方法。

Abkowitz 提出一种小扰动和 Taylor 展开研究 X, Y, N 的表示式的方法，其主要思路是，考虑船舶等速直线运动这一平衡状态： $u = u_0 = V, v = r = 0, \delta = 0, \dot{u} = \dot{v} = \dot{r} = 0$ ，这时在式(1.4.3)中的自变量 n 将不出现；从该点出发，研究偏离平衡状态不远的运动： $u = u_0 + \Delta u, v = \Delta v, r = \Delta r, \dot{u} = \Delta \dot{u}, \dot{v} = \Delta \dot{v}, \dot{r} = \Delta \dot{r}, \delta = \Delta \delta, \Delta u, \Delta v, \dots, \Delta \delta$ 是小量；将 X, Y, N 在平衡点附近展成 Taylor 级数时，在展开式中将仅出现 $\dot{u}, \dot{v}$ 和 $\dot{r}$ 的一次项，因为流体对